

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 09-139539

(43)Date of publication of application : 27.05.1997

(51)Int.Cl.

H01S 3/16
G02F 1/015
G02F 1/35

(21)Application number : 08-059792

(71)Applicant : TOSHIBA CORP

(22)Date of filing : 15.03.1996

(72)Inventor : YAMAMOTO KAZUE

ICHIMURA KOICHI

MOTOMA NOBUHIRO

(30)Priority

Priority number : 07203229
07236643

Priority date : 09.08.1995
14.09.1995

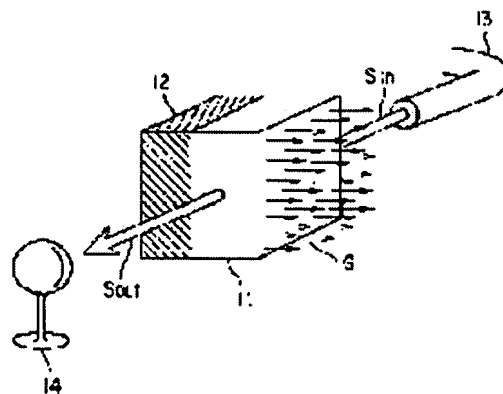
Priority country : JP
JP

(54) OPTICAL ELEMENT

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical modulation element using EIT (electromagnetically induced transparency) of solid.

SOLUTION: This element is provided with an EIT layer 11 as the solid containing impurities which modulates the transmission intensity of a signal light, a semiconductor laser 12 which is formed in contact with the EIT layer 11 and input a gate light G in the EIT layer 11, an optical fiber 13 which inputs a signal light S_{in} in the EIT layer 11, and a photodiode 14 which measures the intensity of an outputted signal light S_{out} from the EIT layer 11. When the interlevel energy between level 2 and level 3 of impurities in the EIT layer 11 is a standard deviation σ_{23} , the interlevel energy between level 1 and level 2 is a standard deviation σ_{12} , and the interlevel energy between level 1 and level 3 is a standard deviation σ_{13} , relations $\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$, $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ are satisfied.



LEGAL STATUS

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-139539

(43) 公開日 平成9年(1997)5月27日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 S 3/16			H 0 1 S 3/16	
G 0 2 F 1/015			G 0 2 F 1/015	
1/35			1/35	

審査請求 未請求 請求項の数25 O L (全 67 頁)

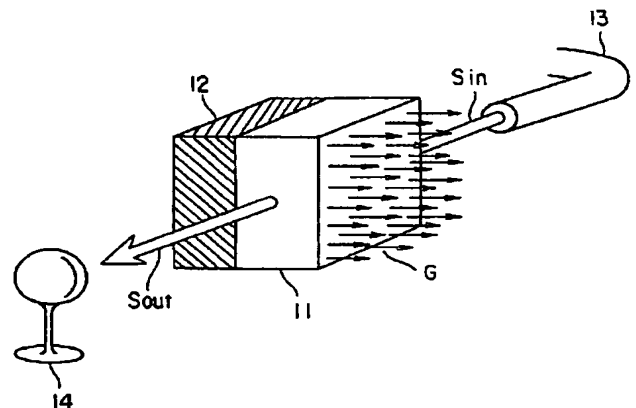
(21) 出願番号	特願平8-59792	(71) 出願人	000003078 株式会社東芝 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地
(22) 出願日	平成8年(1996)3月15日	(72) 発明者	山本 和重 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株 式会社東芝研究開発センター内
(31) 優先権主張番号	特願平7-203229	(72) 発明者	市村 厚一 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株 式会社東芝研究開発センター内
(32) 優先日	平7(1995)8月9日	(72) 発明者	源間 信弘 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株 式会社東芝研究開発センター内
(33) 優先権主張国	日本 (J P)	(74) 代理人	弁理士 鈴江 武彦
(31) 優先権主張番号	特願平7-236643		
(32) 優先日	平7(1995)9月14日		
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		

(54) 【発明の名称】 光素子

(57) 【要約】

【課題】 固体のE I Tを利用した光変調素子を提供すること。

【解決手段】 シグナル光の透過強度を変調する不純物を含む固体であるE I T層11と、このE I T層11に接して設けられ、ゲート光GをE I T層11に入力する半導体レーザー12と、入力シグナル光S_{in}をE I T層11に入力する光ファイバ13と、E I T層11から出力された出力シグナル光S_{out}の強度を測定するフォトダイオード14とを備えている。さらに、E I T層11中の不純物の準位2・準位3間の準位間エネルギーを標準偏差σ₂₃、準位1・準位2間の準位間エネルギーを標準偏差σ₁₂、準位1・準位3間の準位間エネルギーを標準偏差σ₁₃とした場合に、σ₂₃ ≤ σ₁₂、σ₂₃ ≤ σ₁₃の関係が満たされている。



1

【特許請求の範囲】

【請求項 1】不純物を含む固体と、

不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 1 の準位と第 2 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、

前記固体中の不純物の総数を N 個として個々の不純物の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i = 1 \sim N$) とし、

N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle \omega_{12} \rangle$ 、 $\langle \omega_{13} \rangle$ および $\langle \omega_{23} \rangle$ とし、

N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{ (1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle \omega_{12} \rangle]^2 \}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{ (1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle \omega_{13} \rangle]^2 \}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{ (1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle \omega_{23} \rangle]^2 \}^{1/2}$ とした場合に、

$\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ 、且つ $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足することを特徴とする光素子。

【請求項 2】不純物を含む固体と、

不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 2 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、

前記固体中に不純物の総数を N 個として個々の不純物の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i = 1 \sim N$) とし、

N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle \omega_{12} \rangle$ 、 $\langle \omega_{13} \rangle$ および $\langle \omega_{23} \rangle$ とし、
 N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{ (1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle \omega_{12} \rangle]^2 \}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{ (1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle \omega_{13} \rangle]^2 \}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{ (1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle \omega_{23} \rangle]^2 \}^{1/2}$ とした場合に、

$\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足することを特徴とす

2

る光素子。

【請求項 3】不純物を含む固体と、

不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 1 の準位と第 2 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 2 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体で共存させる励起手段とを具備してなり、

10 前記固体中の不純物の総数を N 個として個々の不純物の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i = 1 \sim N$) とし、

N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle \omega_{12} \rangle$ 、 $\langle \omega_{13} \rangle$ および $\langle \omega_{23} \rangle$ とし、

20 N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{ (1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle \omega_{12} \rangle]^2 \}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{ (1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle \omega_{13} \rangle]^2 \}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{ (1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle \omega_{23} \rangle]^2 \}^{1/2}$ とした場合に、

$\sigma_{13} \leq \sigma_{12}$ 、且つ $\sigma_{13} \leq \sigma_{23}$ を満足することを特徴とする光素子。

【請求項 4】前記不純物は、 d 電子軌道に n 個 ($n = 2 \sim 6$) の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第 2 の準位および前記第 3 の準位がともに t_{2g} 軌道に n 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする請求項 1 に記載の光素子。

30 【請求項 5】前記不純物は、 d 電子軌道に n 個 ($n = 7, 8$) の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第 2 の準位および前記第 3 の準位がともに t_{2g} 軌道に 6 個の電子が収容され、 e_g 軌道に $n - 6$ 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする請求項 1 に記載の光素子。

40 【請求項 6】前記不純物は、 d 電子軌道に n 個 ($n = 2 \sim 6$) の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第 1 の準位および前記第 2 の準位がともに t_{2g} 軌道に $n - 1$ 個の電子が収容され、 e_g 軌道に 1 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする請求項 2 に記載の光素子。

50 【請求項 7】前記不純物は、 d 電子軌道に n 個 ($n = 7, 8$) の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結

3

晶場中に置かれた場合に、前記第 1 の準位および前記第 2 の準位がともに t_{2g} 軌道に 5 個の電子が収容され、 e_g 軌道に $n-5$ 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする請求項 2 に記載の光素子。

【請求項 8】前記不純物は、 d 電子軌道に n 個 ($n=2 \sim 6$) の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第 1 の準位および前記第 3 の準位がともに t_{2g} 軌道に n 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする請求項 3 に記載の光素子。

【請求項 9】前記不純物は、 d 電子軌道に n 個 ($n=7, 8$) の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第 1 の準位および前記第 3 の準位がともに t_{2g} 軌道に 6 個の電子が収容され、 e_g 軌道に $n-6$ 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする請求項 3 に記載の光素子。

【請求項 10】前記不純物は、 f 電子軌道に n 個 ($n=1 \sim 13$) の電子を持つ希土類イオンであり、前記第 1 の準位が f 電子軌道に $n-1$ 個の電子が収容され、 d 電子軌道に 1 個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記第 2 の準位および前記第 3 の準位がともに f 電子軌道に n 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする請求項 1 に記載の光素子。

【請求項 11】前記不純物は、 f 電子軌道に n 個 ($n=1 \sim 13$) の電子を持つ希土類イオンであり、前記第 1 の準位および前記第 2 の準位がともに f 電子軌道に $n-1$ 個の電子が収容され、 d 電子軌道に 1 個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記第 3 の準位が f 電子軌道に n 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする請求項 2 に記載の光素子。

【請求項 12】不純物を含む固体と、
不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 1 の準位と第 2 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光を前記固体に照射する光照射手段とを具備してなり、

前記固体中の不純物の総数を N 個として個々の不純物の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i=1 \sim N$) とし、

N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle \omega_{12} \rangle$ 、 $\langle \omega_{13} \rangle$ および $\langle \omega_{23} \rangle$ とし、

N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{ (1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle \omega_{12} \rangle]^2 \}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{ (1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle \omega_{13} \rangle]^2 \}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{ (1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle \omega_{23} \rangle]^2 \}^{1/2}$ とした場合に、

10

【請求項 13】不純物を含む固体と、
不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 2 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光を前記固体に照射する光照射手段とを具備してなり、

前記固体中の不純物の総数を N 個として個々の不純物の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i=1 \sim N$) とし、

N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle \omega_{12} \rangle$ 、 $\langle \omega_{13} \rangle$ および $\langle \omega_{23} \rangle$ とし、

N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{ (1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle \omega_{12} \rangle]^2 \}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{ (1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle \omega_{13} \rangle]^2 \}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{ (1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle \omega_{23} \rangle]^2 \}^{1/2}$ とした場合に、

$\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足する光素子であつて、

前記固体はレーザ媒質として使用され、前記第 1 の光を前記固体に照射するとともに、ポンピング手段により、前記三つの準位のうち前記第 1 の光により結ばれた二つの準位の少なくとも一方から、前記第 1 の準位に電子を励起することにより、レーザ発振を行なうことを特徴とする光素子。

【請求項 14】前記固体中に含まれる不純物は、 f 電子軌道に n 個 ($n=1 \sim 13$) の電子を持つ希土類イオンであり、前記第 1 の準位が f 電子軌道に $n-1$ 個の電子が収容され、 d 電子軌道に 1 個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記第 2 の準位および前記第 3 の準位がともに f 電子軌道に n 個の電子が収容されてなる電子配置をとり、

前記ポンピング手段は、電子線および電磁波の少なくとも一つを前記固体に照射する手段からなることを特徴とする請求項 12 に記載の光素子。

【請求項 15】前記固体中に含まれる不純物は、 f 電子

50

5

軌道に n 個 ($n=1\sim 13$) の電子を持つ希土類イオンであり、前記第 1 の準位および前記第 2 の準位がともに f 電子軌道に $n-1$ 個の電子が収容され、 d 電子軌道に 1 個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記第 3 の準位が f 電子軌道に n 個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記ポンピング手段は電子線および電磁波の少なくとも一つを前記固体に照射する手段からなることを特徴とする請求項 13 に記載の光素子。

【請求項 16】不純物を含む固体と、

この固体に電場、磁場および圧力の少なくとも 1 つの外場を与える手段と、

前記固体に前記外場を与えた状態で、前記不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 1 の準位と第 2 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、前記外場がゼロの場合には、前記固体における前記第 2 の準位と前記第 3 の準位とが縮退していることを特徴とする光素子。

【請求項 17】不純物を含む固体と、

この固体に電場、磁場および圧力の少なくとも 1 つの外場を与える手段と、

前記固体に前記外場を与えた状態で、前記不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 2 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、前記外場がゼロの場合には、前記固体における前記第 1 の準位と前記第 2 の準位とが縮退していることを特徴とする光素子。

【請求項 18】量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、

この固体に電場、磁場および圧力の少なくとも 1 つの外場を与える手段と、

前記固体に前記外場を与えた状態で、前記固体のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 1 の準位と第 2 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、前記外場がゼロの場合には、前記固体における前記第 2 の準位と前記第 3 の準位とが縮退していることを特徴とする光素子。

【請求項 19】量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、

6

この固体に電場、磁場および圧力の少なくとも 1 つの外場を与える手段と、

前記固体に前記外場を与えた状態で、前記固体のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 2 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、前記外場がゼロの場合には、前記固体における前記第 1 の準位と前記第 2 の準位とが縮退していることを特徴とする光素子。

【請求項 20】前記第 1 の光のエネルギーを ω_1 とし、前記第 2 の光のエネルギーを ω_2 とし、前記第 2 の準位と前記第 3 の準位との間のエネルギー差を ω_{23} としたときに、 $\omega_{23} = \omega_2 - \omega_1$ の条件式を満たすように前記外場の大きさが設定されることを特徴とする請求項 16 または請求項 18 に記載の光素子。

【請求項 21】前記第 1 の光のエネルギーを ω_1 とし、前記第 2 の光のエネルギーを ω_2 とし、前記第 1 の準位と前記第 2 の準位との間のエネルギー差を ω_{12} としたときに、 $\omega_{12} = \omega_2 - \omega_1$ の条件式を満たすように前記外場の大きさが設定されることを特徴とする請求項 17 または請求項 19 に記載の光素子。

【請求項 22】量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、前記量子構造の伝導帯に形成されたエネルギー準位の中から選んだ一つの準位を第 1 の準位、前記量子構造の価電子帯に形成されたエネルギー準位の中から二つ準位を選び上から順に第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 1 の準位と第 2 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、前記固体中の量子構造の総数を N 個として個々の量子構造の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i=1\sim N$) とし、

N 個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle \omega_{12} \rangle$ 、 $\langle \omega_{13} \rangle$ および $\langle \omega_{23} \rangle$ とし、

N 個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{ (1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle \omega_{12} \rangle]^2 \}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{ (1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle \omega_{13} \rangle]^2 \}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{ (1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle \omega_{23} \rangle]^2 \}^{1/2}$ とした場合に、

$\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ 、且つ $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足することを特徴とす

7

る光素子。

【請求項23】量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、前記量子構造の伝導帯に形成されたエネルギー準位の中から二つ準位を選び上から順に第1の準位および第2の準位、前記量子構造の価電子帯に形成されたエネルギー準位の中から選んだ1つの準位を第3の準位としたときに、第2の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、

前記固体中の量子構造の総数をN個として個々の量子構造の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i=1\sim N$)とし、

N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、

N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12}=\{(1/N)\sum[\omega_{12}(i)-\langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13}=\{(1/N)\sum[\omega_{13}(i)-\langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23}=\{(1/N)\sum[\omega_{23}(i)-\langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、

$\sigma_{12}\leq\sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12}\leq\sigma_{23}$ を満足することを特徴とする光素子。

【請求項24】量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、

前記量子構造の材料が半導体の場合は、前記量子構造の伝導帯に形成されたエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位とし、前記量子構造の材料が金属の場合は、前記量子構造のフェルミ準位よりも高エネルギーのエネルギー準位の中から二つ準位を選び上から順に第1の準位および第2の準位、かつ前記量子構造のフェルミ準位よりも低エネルギーのエネルギー準位の中から選んだ1つの準位を第3の準位としたときに、第1の準位と第2の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、

前記固体中の量子構造の総数をN個として個々の量子構造の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i=1\sim N$)とし、

8

N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、

N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12}=\{(1/N)\sum[\omega_{12}(i)-\langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13}=\{(1/N)\sum[\omega_{13}(i)-\langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23}=\{(1/N)\sum[\omega_{23}(i)-\langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、

$\sigma_{23}\leq\sigma_{12}$ 、且つ $\sigma_{23}\leq\sigma_{13}$ を満足することを特徴とする光素子。

【請求項25】量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、

前記量子構造の材料が半導体の場合は、前記量子構造の価電子帯に形成されたエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位とし、前記量子構造の材料が金属の場合は、前記量子構造のフェルミ準位よりも高エネルギーのエネルギー準位の中から選んだ1つの準位を第1の準位、かつ前記量子井戸のフェルミ準位よりも低エネルギーのエネルギー準位の中から二つ準位を選び上から順に第2の準位および第3の準位としたときに、第2の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを具備してなり、

前記固体中の量子構造の総数をN個として個々の量子構造の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i=1\sim N$)とし、

N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12}=\{(1/N)\sum[\omega_{12}(i)-\langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13}=\{(1/N)\sum[\omega_{13}(i)-\langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23}=\{(1/N)\sum[\omega_{23}(i)-\langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、

$\sigma_{12}\leq\sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12}\leq\sigma_{23}$ を満足することを特徴とする光素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、固体におけるEIT(electromagnetically induced transparency)に立脚した光素子に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、吸収や発光スペクトルなど物質固有の性質と考えられていた光学的性質に関して、非線形光学過程を一切利用せず、量子力学的なコヒーレンスだけを用いてそれを変調する研究が活発化している。

【0003】例えば、強い吸収を示すはずの波長領域においても物質中を光が吸収されずに透過してしまう“EIT” (K. -J. Boller et al., Phys. Rev. Lett. 66, 2593 (1991))、反転分布無しでもレーザー発振が可能のため、特に反転分布を形成することが困難な紫外線～X線領域にかけての短波長レーザーの実現に期待がかかる“lasing without inversion” (略してLWI; S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. 62, 1033 (1989))、物質の屈折率を非常に大きくすることが可能な“enhancement of index of refraction” (M. O. Scully, Phys. Rev. Lett. 67, 1855 (1991))、励起光を照射しているにも拘らずある特定準位に電子を閉じ込めてしまう“population trapping” (E. Arimondo et al., Lett. Nuovo Cimento 17, 333 (1976))などの研究が活発化している。これら研究に伴い、この種の量子コヒーレンスを応用した光変調素子やLWIレーザーなど各種光素子の研究開発も積極的に進められている。

【0004】量子コヒーレンスに基づく物質の光学的性質の変調現象の中でも、特にEITは上述した現象の全ての基礎であり、例えばLWIレーザーなどではそれを実現する上で必要不可欠な基本技術と考えられている。

【0005】EITはもともと原子ガスにレーザー光を2本照射した際に見出だされた現象で、1976年の発見以来様々な原子ガスで同様な現象が確認されている。例えば、H. R. Gray et al., Opt. Lett. 3, 218 (1978); M. Kaivola et al., Opt. Commun. 49, 418 (1984); A. Aspect et al., Phys. Rev. Lett. 61, 826 (1988); S. Adachi et al., Opt. Commun. 81, 364 (1991); A. M. Akul'sin et al., Opt. Commun. 84, 139 (1991); Y. -Q. Li et al., Phys. Rev. A 51, R1754 (1995); A. Kasapi et al., Phys. Rev. Lett. 74, 2447 (1995)に報告されている。

【0006】なお、発見当時はまだEITとは言わず、population trappingと呼ばれていた。EITはスペクトルに着目した場合、population trappingは電子分布に着目した場合の名称で、もともとは同じ現象をさしていた (G. Alzetta et al., Nuovo Cimen

to B 36, 5 (1976))。

【0007】図1は、原子ガスのエネルギー準位と入射光を模式的に示したものである。この図1を用いてEITの基本原理解を説明する。

【0008】対象となる系は、基本的に3つの準位と2本のコヒーレント光 (第1の光、第2の光) とから構成される。準位と光の組み合わせに関係して、図1に示すように、3種の励起型が存在する。

【0009】すなわち、図1(a)に示すように一番上の準位1を共通準位として第1、第2の光で励起する Λ 型励起と、図1(b)に示すように基底準位3が共通準位となるV型励起と、図1(c)に示すように真ん中の準位2が共通準位となる Ξ 型励起である。

【0010】まず、 Λ 型励起の場合に着目し、第1の光 (光1) の光子エネルギー ω_1 が準位1・2間のエネルギー ω_{12} に一致する条件; $\Delta\omega_1 = \omega_1 - \omega_{12} = 0$ において、第2の光 (光2) の光子エネルギー ω_2 を変化させながらその光吸収スペクトルを調べた場合を考える。

【0011】図2(a)はこの条件下における第2の光の光吸収スペクトルを示す。なお、横軸の $\Delta\omega_2$ は第2の光の光子エネルギー ω_2 と準位1・3間のエネルギーとの差; $\Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_{13}$ で整理し直している。

【0012】図2(a)に示すように、本来単一の吸収ピークを示すはずのスペクトルには、 $\Delta\omega_2 = 0$ ($=\Delta\omega_1$) で吸収の孔、すなわち透明領域が生ずる。この時の孔の幅 Ω は、第1の光、第2の光のラビ周波数をそれぞれ Ω_{12} , Ω_{13} とすると、 $\Omega \sim (\Omega_{12}^2 + \Omega_{13}^2)^{1/2}$ となる。

【0013】なお、ラビ周波数は光の強さを表す量であって、ラビ周波数 Ω_{12} , Ω_{13} は、それぞれ、 $2\pi\mu_{12}E_{12}/h$, $2\pi\mu_{13}E_{13}/h$ で定義される。

【0014】ここで、 μ_{12} は準位1・2間の電気双極子モーメント、 μ_{13} は準位1・3間の電気双極子モーメント、 E_{12} は第1の光の電場強度、 E_{13} は第2の光の電場強度、 h はプランク定数を表している。

【0015】図2(b)に、 $\Delta\omega_1 \neq 0$ の状態に第1の光の光子エネルギーを固定した場合の第2の光の光吸収スペクトルを示す。図2(b)から、 $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ となる吸収の裾の領域には、やはり第2の光が吸収されない透明領域が形成されることが分かる。この場合の孔の幅 Ω も、 $\Omega \sim (\Omega_{12}^2 + \Omega_{13}^2)^{1/2}$ となる。

【0016】このように3つの準位に2本の第1の光、第2の光が入射すると、 $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満たす波長では、本来強い吸収を示す領域であっても光が吸収されなくなるEITが起きる。

【0017】この吸収が消える物理的起源は、直感的には準位3から準位1への光学遷移と準位2から準位1への遷移が干渉効果により互いに打ち消し合うことによる。起源に関するより詳細な説明は、量子力学、特に密度行列を解析することで行うことができ、実際に吸収が

無くなることが示されている。

【0018】以上の結果は全て Λ 型励起に関するものであるが、V型励起では第1の光(光1)、第2の光(光2)が $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満たすとき、また、 Ξ 型励起では $\Delta\omega_1 = -\Delta\omega_2$ を満たすときに光吸収は弱まり吸収スペクトルは2本のピークに分裂することが、原子ガスをを用いた実験と理論計算の両面から確認されている。

【0019】なお、密度行列の解析結果より、光吸収が厳密にゼロになるのは Λ 型励起の場合だけであるが、V型励起、 Ξ 型励起においても2本の光を用いることで光吸収を限りなくゼロに近い値まで低減できることが示されている。

【0020】次に、このEITを基礎とするLWIの原理について説明する。

【0021】LWIも準位と光の組み合わせに関係して Λ 型、V型、 Ξ 型励起の3つのスキームがあるが、ここでは Λ 型励起の場合に注目する。

【0022】図63(a)は、原子ガスのエネルギー準位と入射光を模式的に示したものである。

【0023】ここで、新たに付け加えられた光3は、基底状態から励起状態へ電子をインコヒーレントにポンピングするインコヒーレント光である。

【0024】いま、系に入射するコヒーレントな光1、2が条件 $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満たし、準位3から準位1への吸収スペクトルに透明領域が形成されている状況を考える。

【0025】ここで、準位1・3間の遷移エネルギーを含むようなインコヒーレントな光3を照射した場合、この光3は系により吸収される。これは、直感的にはインコヒーレント光に対してはEITによる干渉効果が働かず、準位3から準位1は透明にならないためである。光3により準位3から準位1に励起された電子は、誘導放射によりコヒーレント光として再び準位3に落ちる。

【0026】すなわち、準位1・3間の遷移において、インコヒーレント光は吸収されて発光するコヒーレント光は吸収されないという吸収と発光の非対称性のために、インコヒーレントな光3によりコヒーレントな光2が増幅される訳である。

【0027】このような現象は励起状態である準位1、2のポピュレーションの和が、基底状態である準位3のポピュレーションより小さい場合でも起きることから、新しいレーザー発振の原理として注目されている。

【0028】このように、反転分布無しで光2を増幅するためには、基底状態である準位3から励起状態である準位1もしくは準位2、またはその両方に電子をインコヒーレントにポンピングする手段が必須となる。

【0029】図63(b)は、準位1と準位2との間に存在する新たな準位4を用い、この準位4を経由して準位2に電子をポンピングするスキームを示し、この場合も反転分布無しで光2を増幅することができる。

【0030】なお、ポンピング光にはコヒーレント光、インコヒーレント光どちらを用いても良い。また、光以外のポンピング手段として、図63(c)に示すように電子線を用いることも可能で、この場合も反転分布無しで光2を増幅することができる。

【0031】LWIレーザーを構成するには、図64に示すようにEIT媒質101を二つのミラー102で挟んだ構造の共発振器を形成し、コヒーレント光として光1のみを照射し、さらに基底状態から励起状態へ電子を光3によりインコヒーレントにポンピングすれば良い。

【0032】ここで、準位1・2間を励起する光1の光子エネルギーを ω_1 、準位2・3間の準位エネルギーを ω_{23} とすると、光子エネルギー($\omega_1 + \omega_{23}$)を中心にその近辺ではレーザー発振の利得が生じるため、コヒーレント光が発生する。反転分布無しでもレーザー発振が起きる物理的起源に関するより詳細な説明は、EITの場合と同様、密度行列を解析することで示すことができる。

【0033】以上の結果は全て Λ 型励起に関するものであるが、V型、 Ξ 型励起の場合についても、EITによる吸収の孔があいた透明領域においてレーザー発振の利得が生じ、やはりLWIが可能であることが、密度行列の計算結果から示されている。

【0034】以上のことから、このようなEITを固体に応用すれば、2本の光のうちの一方をゲートに用いて他方を光の出力強度を制御することにより、原理的に強い光を必要とする既存の非線形光学を利用した光変調素子に代わり、微弱な光でも十分に動作可能な光変調素子や、反転分布無しでもレーザー発振が可能なLWIレーザーの実現に道が開け、さらには光学遷移の変調現象と磁性・電気伝導性・強誘電性など固体の持つ様々な物性とを組み合わせることで従来の電子素子とは異なる新しいタイプの機能素子の創作も期待できる。

【0035】しかしながら、固体へのEITの適用には以下のような困難があった。すなわち、EITは特定準位間の光学遷移の干渉を利用するため、固体でのEITを実現するのにバンドを形成するような準位を用いることは困難である。

【0036】そこで、最近、固体の中でもエネルギー準位が比較的離散的な半導体超格子、不純物、欠陥などを利用して、EITの実現を目指した研究が活発に行われ始めた(例えば、A. Imamoglu et al., Opt. Lett. 19, 1744 (1994); P. J. Harshman et al., IEEE J. Quantum Electronics 30, 2297 (1994); D. Huang et al., J. Opt. Soc. Am. B11, 2297 (1994); Y. Zhu et al., Phys. Rev. A49, 4016 (1994))。

【0037】しかしながら、現在までのところ固体では

原子ガスで見られたような顕著な EIT 特性は得られていない。その原因は、半導体超格子の場合には現状の素子作製技術では超格子構造を均一に作ることができずエネルギー準位に大きなバラつきがあること、また、不純物や欠陥の場合にはその周囲の結晶場に分布があるためやはりエネルギー準位には大きなバラつきが生じてしまうことによる。

【0038】このようなエネルギー準位のバラつきに由来して、EIT を起こすための条件である $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ (A 型励起と V 型励起の場合)、または $\Delta\omega_1 = -\Delta\omega_2$ (E 型励起の場合) を同時に満足する超格子や不純物、欠陥の数は少なくなり、光学遷移の EIT 特性も原子ガスと比較して小さくなる。

【0039】すなわち、現状の素子作製技術では固体中のエネルギー準位の不均一さを原子ガスの準位と同程度のレベルにまで減らして整えることは難しく、これまでのところ、光変調素子や LWI レーザーなど量子コヒーレンスに基づく光素子に必要な、EIT に由来する大きな光変調特性は固体においては得られていなかった。

【0040】

【発明が解決しようとする課題】 上述したように、従来の技術では、原子ガスで見られた量子コヒーレンスに基づく EIT をそのまま固体のエネルギー準位に適用した場合、固体中の準位のランダムなバラつきに起因して十分な EIT 特性は得られていなかった。

【0041】本発明は、上記事情を考慮してなされたもので、その目的とするところは、固体における EIT に立脚した実用可能な光素子を提供することにある。

【0042】

【課題を解決するための手段】

【概要】 上記目的を達成するために、本発明に係る光素子（請求項 1）は、不純物を含む固体と、不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 1 の準位と第 2 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記固体中の不純物の総数を N 個として個々の不純物の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i = 1 \sim N$) とし、N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{(1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{(1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{23} = \{(1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足することを特徴とする。

N) $\sum [\omega_{13}(i) - \langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{(1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ 、且つ $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足することを特徴とする。

【0043】また、本発明に係る他の光素子（請求項 2）は、不純物を含む固体と、不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 2 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 1 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記固体中に不純物の総数を N 個として個々の不純物の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i = 1 \sim N$) とし、N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{(1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{(1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{(1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足することを特徴とする。

【0044】また、本発明に係る他の光素子（請求項 3）は、不純物を含む固体と、不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第 1 の準位、第 2 の準位および第 3 の準位としたときに、第 1 の準位と第 2 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 1 の光、ならびに第 2 の準位と第 3 の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第 2 の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記固体中の不純物の総数を N 個として個々の不純物の第 1 の準位と第 2 の準位との間の準位間エネルギー、第 1 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーおよび第 2 の準位と第 3 の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i = 1 \sim N$) とし、N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N 個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{(1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{(1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{(1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{13} \leq \sigma_{12}$ 、且つ $\sigma_{13} \leq \sigma_{23}$ を満足することを特徴とする。

15

【0045】また、本発明に係る他の光素子（請求項4）は、上記光素子（請求項1）において、前記不純物が、d電子軌道にn個（ $n=2\sim6$ ）の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第2の準位および前記第3の準位がともに t_{2g} 軌道にn個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする。

【0046】また、本発明に係る他の光素子（請求項5）は、上記光素子（請求項1）において、前記不純物が、d電子軌道にn個（ $n=7, 8$ ）の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第2の準位および前記第3の準位がともに t_{2g} 軌道に6個の電子が収容され、 e_g 軌道に $n-6$ 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする。

【0047】また、本発明に係る他の光素子（請求項6）は、上記光素子（請求項2）において、前記不純物が、d電子軌道にn個（ $n=2\sim6$ ）の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第1の準位および前記第2の準位がともに t_{2g} 軌道に $n-1$ 個の電子が収容され、 e_g 軌道に1個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする。

【0048】また、本発明に係る他の光素子（請求項7）は、上記光素子（請求項2）において、前記不純物が、d電子軌道にn個（ $n=7, 8$ ）の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第1の準位および前記第2の準位がともに t_{2g} 軌道に85個の電子が収容され、 e_g 軌道に $n-5$ 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする。

【0049】また、本発明に係る他の光素子（請求項8）は、上記光素子（請求項3）において、前記不純物が、d電子軌道にn個（ $n=2\sim6$ ）の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第1の準位および前記第3の準位がともに t_{2g} 軌道にn個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする。

【0050】また、本発明に係る他の光素子（請求項9）は、上記光素子（請求項3）において、前記不純物が、d電子軌道にn個（ $n=7, 8$ ）の電子を持つ遷移金属イオンであり、かつこの遷移金属イオンが配位子によって作られた立方対称な結晶場中に置かれた場合に、前記第1の準位および前記第3の準位がともに t_{2g} 軌道に6個の電子が収容され、 e_g 軌道に $n-6$ 個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする。

【0051】また、本発明に係る他の光素子（請求項10）は、上記光素子（請求項1）において、前記不純物

16

が、f電子軌道にn個（ $n=1\sim13$ ）の電子を持つ希土類イオンであり、前記第1の準位がf電子軌道に $n-1$ 個の電子が収容され、d電子軌道に1個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記第2の準位および前記第3の準位がともにf電子軌道にn個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする。

【0052】また、本発明に係る他の光素子（請求項11）は、上記光素子（請求項2）において、前記不純物が、f電子軌道にn個（ $n=1\sim13$ ）の電子を持つ希土類イオンであり、前記第1の準位および前記第2の準位がともにf電子軌道に $n-1$ 個の電子が収容され、d電子軌道に1個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記第3の準位がf電子軌道にn個の電子が収容されてなる電子配置をとることを特徴とする。

【0053】また、本発明に係る他の光素子（請求項12）は、不純物を含む固体と、不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位としたときに、第1の準位と第2の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光を前記固体に照射する光照射手段とを備えており、前記固体中の不純物の総数をN個として個々の不純物の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ （ $i=1\sim N$ ）とし、N個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12}=\{(1/N)\sum[\omega_{12}(i)-\langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13}=\{(1/N)\sum[\omega_{13}(i)-\langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23}=\{(1/N)\sum[\omega_{23}(i)-\langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{23}\leq\sigma_{12}$ 、かつ $\sigma_{23}\leq\sigma_{13}$ を満足する光素子であって、前記固体はレーザ媒質として使用され、前記第1の光を前記固体に照射するとともに、ポンピング手段により、前記三つの準位のうち前記第1の光により結ばれた二つの準位の少なくとも一方に電子を励起することにより、レーザ発振を行なうことを特徴とする。

【0054】また、本発明に係る他の光素子（請求項13）は、不純物を含む固体と、不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位としたときに、第2の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光を前記固体に照射する光照射手段とを備えており、前記固体中の不純物の総数をN個として個々の不純物の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$

1~N)とし、N個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N個全ての不純物についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12} = \{(1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13} = \{(1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23} = \{(1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足する光素子であって、前記固体はレーザ媒質として使用され、前記第1の光を前記固体に照射するとともに、ポンピング手段により、前記三つの準位のうち前記第1の光により結ばれた二つの準位の少なくとも一方から、前記第1の準位に電子を励起することにより、レーザー発振を行なうことを特徴とする。

【0055】また、本発明に係る他の光素子(請求項14)は、上記光素子(請求項12)において、前記固体中に含まれる不純物が、f電子軌道にn個($n=1\sim 13$)の電子を持つ希土類イオンであり、前記第1の準位がf電子軌道にn-1個の電子が収容され、d電子軌道に1個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記第2の準位および前記第3の準位がともにf電子軌道にn個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記ポンピング手段は、電子線および電磁波の少なくとも一つを前記固体に照射する手段からなることを特徴とする。

【0056】また、本発明に係る他の光素子(請求項15)は、上記光素子(請求項13)において、前記固体中に含まれる不純物が、f電子軌道にn個($n=1\sim 13$)の電子を持つ希土類イオンであり、前記第1の準位および前記第2の準位がともにf電子軌道にn-1個の電子が収容され、d電子軌道に1個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記第3の準位がf電子軌道にn個の電子が収容されてなる電子配置をとり、前記ポンピング手段は電子線および電磁波の少なくとも一つを前記固体に照射する手段からなることを特徴とする。

【0057】後述する固体材料においては、準位間エネルギーの分布は各エネルギー準位の対称性から予測することが可能である。一般には、対称性が等しいかまたは類似した準位間ではエネルギーの分散が小さくなり、さらに光学遷移も禁制となる場合が多いことが知られている。これに対して、対称性が異なる準位間ではそれが等しい準位間と比較してエネルギーの分散が大きくなり、光学遷移も許容となる場合が多くなる。

【0058】したがって、本発明(請求項1)に係る光素子では、第2の準位、第3の準位の対称性が同じかまたは類似し、第1の準位のそれが異なる材料系を選択し、本発明(請求項2)に係る光素子では、第1の準位、第2の準位の対称性が同じかまたは類似し、第3の準位のそれが異なる材料系を選択し、そして本発明(請求項3)に係る光素子では、第1の準位、第3の準位の

対称性が同じかまたは類似し、第2の準位のそれが異なる材料系を選択することにより、先の条件式を実現することが可能となる。

【0059】ここで、上述の条件式を満たす固体材料には、不純物としてTi, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cuなどの第1次遷移金属元素、Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Agなどの第2次遷移金属元素、Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Auなどの第3次遷移金属元素、Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Ybなどのランタノイド系希土類元素、そしてTh, Pa, Uなどのアクチノイド系希土類元素を少なくとも一種類以上は含む、LiF, NaF, KF, RbF, CsF, MgF₂, CaF₂, SrF₂, BaF₂, MnF₂, ZnF₂, CdF₂, AlF₃, YF₃, LaF₃, CeF₃, PrF₃, NdF₃, SmF₃, EuF₃, GdF₃, TbF₃, DyF₃, HoF₃, ErF₃, TmF₃, YbF₃, LuF₃, LiBaF₃, KMgF₃, KMnF₃, KZnF₃, KNiF₃, RbNiF₃, ZrF₄, LiYF₄, NaYF₄, KYF₄, LiLaF₄, LiGdF₄, LiLuF₄, BaAlF₅, SrAlF₅, K₃YF₆, K₃CoF₆, Cs₃NdF₇, Cs₃GdF₇, LiCl, NaCl, KCl, RbCl, CsCl, YCl₃, LaCl₃, CeCl₃, PrCl₃, NdCl₃, SmCl₃, EuCl₃, GdCl₃, TbCl₃, DyCl₃, HoCl₃, ErCl₃, TmCl₃, YbCl₃, LuCl₃, CsMgCl₃, CsCdCl₃, LiBr, NaBr, KBr, RbBr, CsBr, YBr₃, LaBr₃, CeBr₃, PrBr₃, NdBr₃, SmBr₃, EuBr₃, GdBr₃, TbBr₃, DyBr₃, HoBr₃, ErBr₃, TmBr₃, YbBr₃, LuBr₃, CsMgBr₃, LiI, NaI, KI, RbI, CsI, CuCl, CuBr, CuI, AgF, AgCl, AgBr, AgI, YOC₂, LaOC₂, LaOBr, TlCl, TlBr, TlI, InBr, InI, Li₂O, BeO, N₂O₅, Na₂O, P₂O₃, S₂O₃, K₂O, CaO, Cr₂O₃, MnO₂, CoO, NiO, SrO, ZrO₂, Nb₂O₅, MoO₃, AgO, Sb₂O₃, TeO₂, BaO, WO₃, Re₂O₇, PbO, PuO₂, Y₂O₃, La₂O₃, Ce₂O₃, Pr₂O₃, Nd₂O₃, Sm₂O₃, Eu₂O₃, Gd₂O₃, Tb₂O₃, Dy₂O₃, Ho₂O₃, Er₂O₃, Tm₂O₃, Yb₂O₃, Lu₂O₃, ThO₂, UO₂, UO₃, Ba₂GdNbO₅, SrGdGa₃O₇, Sc₂Gd₃Ga₃O₁₂, NaLuO₁₂, LiIO₃, LiNbO₃, LiTaO₃, Ba₂NaNb₅O₁₅, Y₂O₂S, La₂O₂S, Ce₂O₂S, Pr₂O₂S, Nd₂O₂S, Sm₂O₂S, Eu₂O₂S, G

19

d_2O_2S , Tb_2O_2S , Dy_2O_2S , Ho_2O_2S , Er_2O_2S , Tm_2O_2S , Yb_2O_2S , Lu_2O_2S , Y_2S_3 , La_2S_3 , Ce_2S_3 , Pr_2S_3 , Nd_2S_3 , Sm_2S_3 , Eu_2S_3 , Gd_2S_3 , Tb_2S_3 , Dy_2S_3 , Ho_2S_3 , Er_2S_3 , Tm_2S_3 , Yb_2S_3 , Lu_2S_3 , B_2O_3 , $GaBO_3$, $InBO_3$, $TlBO_3$, $ScBO_3$, YBO_3 , $LaBO_3$, $CeBO_3$, $PrBO_3$, $NdBO_3$, $SmBO_3$, $EuBO_3$, $GdBO_3$, $TbBO_3$, $DyBO_3$, $HoBO_3$, $ErBO_3$, $TmBO_3$, $YbBO_3$, $LuBO_3$, $CaYBO_4$, BaB_2O_4 , $Cd_2B_2O_5$, LiB_3O_5 , CsB_3O_5 , SrB_4O_7 , $Al_3TbB_4O_{12}$, ZnO , $ZnGa_2O_4$, MgO , $MgGa_2O_4$, Mg_2TiO_4 , $Mg_4Ta_2O_9$, TiO_2 , $CaTiO_3$, $SrTiO_3$, $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, $KTiPO_5$, Al_2O_3 , $LiAlO_2$, $YAlO_3$, $BeAl_2O_4$, $MgAl_2O_4$, $ZnAl_2O_4$, $LiAl_5O_8$, $Y_4Al_2O_9$, $YAl_3B_4O_{12}$, $Y_3Al_5O_{12}$, $La_3Al_5O_{12}$, $Ce_3Al_5O_{12}$, $Pr_3Al_5O_{12}$, $Nd_3Al_5O_{12}$, $Sm_3Al_5O_{12}$, $Eu_3Al_5O_{12}$, $Gd_3Al_5O_{12}$, $Tb_3Al_5O_{12}$, $Dy_3Al_5O_{12}$, $Ho_3Al_5O_{12}$, $Er_3Al_5O_{12}$, $Tm_3Al_5O_{12}$, $Yb_3Al_5O_{12}$, $Lu_3Al_5O_{12}$, $LaAl_{11}O_{18}$, $CeMgAl_{11}O_{19}$, $TbMgAl_{11}O_{19}$, $BaAl_{12}O_{19}$, $BaMg_2Al_{16}O_{27}$, Fe_2O_3 , $Y_3Fe_5O_{12}$, $La_3Fe_5O_{12}$, $Ce_3Fe_5O_{12}$, $Pr_3Fe_5O_{12}$, $Nd_3Fe_5O_{12}$, $Sm_3Fe_5O_{12}$, $Eu_3Fe_5O_{12}$, $Gd_3Fe_5O_{12}$, $Tb_3Fe_5O_{12}$, $Dy_3Fe_5O_{12}$, $Ho_3Fe_5O_{12}$, $Er_3Fe_5O_{12}$, $Tm_3Fe_5O_{12}$, $Yb_3Fe_5O_{12}$, $Lu_3Fe_5O_{12}$, $Y_3Ga_5O_{12}$, $La_3Ga_5O_{12}$, $Ce_3Ga_5O_{12}$, $Pr_3Ga_5O_{12}$, $Nd_3Ga_5O_{12}$, $Sm_3Ga_5O_{12}$, $Eu_3Ga_5O_{12}$, $Gd_3Ga_5O_{12}$, $Tb_3Ga_5O_{12}$, $Dy_3Ga_5O_{12}$, $Ho_3Ga_5O_{12}$, $Er_3Ga_5O_{12}$, $Tm_3Ga_5O_{12}$, $Yb_3Ga_5O_{12}$, $Lu_3Ga_5O_{12}$, $Y_3Sc_2Ga_5O_{12}$, $CaPO_3$, $ScPO_4$, YPO_4 , $LaPO_4$, $CePO_4$, $PrPO_4$, $NbPO_4$, $SmPO_4$, $EuPO_4$, $GdPO_4$, $TmPO_4$, $DyPO_4$, $HoPO_4$, $ErPO_4$, $TmPO_4$, $YbPO_4$, $LuPO_4$, Ca_2PO_4Cl , $Mg_3(P_2O_7)_2$, $Ca_3(PO_4)_2$, $Sr_3(PO_4)_2$, $Ba_3(PO_4)_2$, $Zn_3(PO_4)_2$, $Cd_3(PO_4)_2$, $Mg_5(PO_4)_3F$, $Mg_5(PO_4)_3Cl$, $Ca_5(PO_4)_3F$, $Ca_5(PO_4)_3Cl$, $Sr_5(PO_4)_3F$, $Sr_5(PO_4)_3Cl$, $Ba_5(PO_4)_3F$, $Ba_5(PO_4)_3Cl$, $Sr_2P_2O_7$, NdP_5O_{14} , SiO_2 , $BeSiO_3$,

20

$MgSiO_3$, $CaSiO_3$, $SrSiO_3$, $BaSiO_3$, $ZnSiO_3$, $CdSiO_3$, Zn_2SiO_4 , $NaYSiO_4$, Y_2SiO_5 , La_2SiO_5 , Lu_2SiO_5 , $BeSi_2O_5$, $MgSi_2O_5$, $CaSi_2O_5$, $SrSi_2O_5$, $BaSi_2O_5$, $Sc_2Si_2O_7$, $Be_2SrSi_2O_7$, $Ca_2MgSi_2O_7$, Si_3N_4 , GeO_2 , Zn_2GeO_4 , $Cs_2UO_2F_4$, $Cs_2UO_2Cl_4$, $Cs_2UO_2Br_4$, $Cs_3UO_2F_5$, $Cs_3UO_2Cl_5$, $Cs_3UO_2Br_5$, $MgWO_4$, $CaWO_4$, $SrWO_4$, $BaWO_4$, $AlWO_4$, $CdWO_4$, $PbWO_4$, Y_2WO_6 , $MgMoO_4$, $CaMoO_4$, $SrMoO_4$, $BaMoO_4$, Li_2MoO_4 , $Y_2Mo_3O_{12}$, $La_2Mo_3O_{12}$, $Ce_2Mo_3O_{12}$, $Pr_2Mo_3O_{12}$, $Nd_2Mo_3O_{12}$, $Sm_2Mo_3O_{12}$, $Eu_2Mo_3O_{12}$, $Gd_2Mo_3O_{12}$, $Tb_2Mo_3O_{12}$, $Dy_2Mo_3O_{12}$, $Ho_2Mo_3O_{12}$, $Er_2Mo_3O_{12}$, $Tm_2Mo_3O_{12}$, $Yb_2Mo_3O_{12}$, $Lu_2Mo_3O_{12}$, $NaCVO_4$, $ScVO_4$, YVO_4 , $Mg_3(VO_4)_2$, $Ca_3(VO_4)_2$, $Sr_3(VO_4)_2$, $Ba_3(VO_4)_2$, $Zn_3(VO_4)_2$, $Cd_3(VO_4)_2$, $Mg_5(VO_4)_3F$, $Mg_5(VO_4)_3Cl$, $Ca_5(VO_4)_3F$, $Ca_5(VO_4)_3Cl$, $Sr_5(VO_4)_3F$, $Sr_5(VO_4)_3Cl$, $Ba_5(VO_4)_3F$, $Ba_5(VO_4)_3Cl$, CaS , SrS , BaS , $CaSe$, $SrSe$, $BaSe$ や、その他フッ化物・ハロゲン化物・臭化物・ヨウ化物・ハロゲン化銅・ハロゲン化銀・酸ハロゲン化物・タリウム化合物・インジウム化合物・ホウ酸塩・亜鉛酸化物・マグネシウム酸化物・チタニウム酸化物・アルミン酸塩・ガーネット・ケイ酸塩・ゲルマニウム酸塩・イットリウム化合物・ランタン化合物・セリウム化合物・プラセオジウム化合物・ネオジウム化合物・サマリウム化合物・ユーロピウム化合物・ガドリニウム化合物・テルビウム化合物・ジスプロシウム化合物・ホルミウム化合物・エルビウム化合物・ツリウム化合物・イッテルビウム化合物・ルテチウム化合物・ウラン化合物・リン酸塩・シェーレ化合物・硫化物・セレン化合物などの絶縁性無機材料を用いることができる。

【0060】これに加えて、上記の遷移金属元素や希土類元素を不純物として少なくとも一種以上含む、ダイヤモンド、 Si , SiC , $SiGe$, Ge , $GaAs$, GaP , GaN , $GaSb$, $AlAs$, AlP , AlN , $AlSb$, $InAs$, InP , $InSb$, HgS , $HgSe$, $HgTe$, BAs , BP , BN , ZnS , $ZnSe$, $ZnTe$, CdS , $CdSe$, $CdTe$, Cu_2O , SnO_2 , In_2O_3 などの半導体あるいは半絶縁性材料を用いることもできる。なお、上記材料中において遷移金属元素や希土類元素は通常イオンの状態で存在するが、その価数は特に限定されない。

【0061】また、本発明において光励起される電子遷移としては、第1次遷移金属イオンを励起する場合にはこのイオンの3d準位が関与する $d \rightarrow d$ 遷移、第2次遷移金属イオンを励起する場合には4d準位が関与する $d \rightarrow d$ 遷移、第3次遷移金属イオンを励起する場合には5d準位が関与する $d \rightarrow d$ 遷移、ランタノイド系希土類イオンを励起する場合には4f、5d準位が関与する $f \rightarrow f$ 遷移や $f \rightarrow d$ 遷移、アクチノイド系希土類イオンを励起する場合には5f準位が関与する $f \rightarrow f$ 遷移がそれぞれ用いられる。さらに、光源にはコヒーレント光、すなわちレーザー光が用いられる。上述の電子遷移と周波数が合えばレーザーの種類は特に限定されないが、小型素子の形成に有利な半導体レーザーを用いることが望ましい。

【0062】なお、本発明では、上述したようなEITを実現し得る固体について、素子単位をアレイ化などして機能素子とする場合においては、各素子単位毎に本発明（請求項1～請求項3）の条件式が満足されれば良い。

【0063】また、本発明（請求項16～請求項21）の骨子は、光素子を構成する固体として、固体に外場（電場、磁場、圧力）を与えながら、固体中の3準位のうち2つの電子遷移を Λ 型またはV型に光励起する際、光で結ばれない2準位が外場の無いときには縮退しているものを用いることにある。

【0064】すなわち、本発明に他の係る光素子（請求項16）は、不純物を含む固体と、この固体に電場、磁場および圧力の少なくとも1つの外場を与える手段と、前記固体に前記外場を与えた状態で、前記不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位としたときに、第1の準位と第2の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記外場がゼロの場合には、前記固体における前記第2の準位と前記第3の準位とが縮退していることを特徴とする。

【0065】すなわち、本発明に他の係る光素子（請求項17）は、不純物を含む固体と、この固体に電場、磁場および圧力の少なくとも1つの外場を与える手段と、前記固体に前記外場を与えた状態で、前記不純物のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位としたときに、第2の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記外場がゼロの場合には、前記固体中における前記第1の準位と前記第2の準位とが縮退していることを特徴とす

る。

【0066】また、本発明に他の係る光素子（請求項18）は、量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、この固体に電場、磁場および圧力の少なくとも1つの外場を与える手段と、前記固体に前記外場を与えた状態で、前記固体のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位としたときに、第1の準位と第2の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記外場がゼロの場合には、前記固体における前記第2の準位と前記第3の準位とが縮退していることを特徴とする。

【0067】また、本発明に他の係る光素子（請求項19）は、量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、この固体に電場、磁場および圧力の少なくとも1つの外場を与える手段と、前記固体に前記外場を与えた状態で、前記固体のエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位としたときに、第2の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記外場がゼロの場合には、前記固体における前記第1の準位と前記第2の準位とが縮退していることを特徴とする。

【0068】また、本発明に他の係る光素子（請求項20）は、上記光素子（請求項16、請求項18）において、前記第1の光のエネルギーを ω_1 とし、前記第2の光のエネルギーを ω_2 とし、前記第2の準位と前記第3の準位との間のエネルギー差を ω_{23} としたときに、 $\omega_{23} = \omega_2 - \omega_1$ の条件式を満たすように前記外場の大きさが設定されることを特徴とする。

【0069】また、本発明に他の係る光素子（請求項21）は、上記光素子（請求項17、請求項19）において、前記第1の光のエネルギーを ω_1 とし、前記第2の光のエネルギーを ω_2 とし、前記第1の準位と前記第2の準位との間のエネルギー差を ω_{12} としたときに、 $\omega_{12} = \omega_2 - \omega_1$ の条件式を満たすように前記外場の大きさが設定されることを特徴とする。

【0070】ここで、上記光素子（請求項16～請求項21）において、外場としての電場を与える手段は、例えば、固体を挟む2つの電極と、これら電極の間に電圧を印加する電源とにより構成される。

【0071】また、本発明（請求項16～請求項17）に用いられる光素子の材料には、p. 25～p. 28に列举したものと同一材料があげられる。

【0072】上記本発明（請求項18、請求項19）は、半導体素子作製技術が向上し、エネルギー準位の不

23

均一さが原子ガスのそれと同程度のレベルにまで低減した場合に、量子井戸や、量子細線や、量子箱といった量子構造を用いるというものである。

【0073】また、本発明に係る他の光素子（請求項2）は、量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、前記量子構造の伝導帯に形成されたエネルギー準位の中から選んだ一つの準位を第1の準位、前記量子構造の価電子帯に形成されたエネルギー準位の中から二つ準位を選び上から順に第2の準位および第3の準位としたときに、第1の準位と第2の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記固体中の量子構造の総数をN個として個々の量子構造の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ （ $i=1\sim N$ ）とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12}=\{(1/N)\sum[\omega_{12}(i)-\langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13}=\{(1/N)\sum[\omega_{13}(i)-\langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23}=\{(1/N)\sum[\omega_{23}(i)-\langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{23}\leq\sigma_{12}$ 、且つ $\sigma_{23}\leq\sigma_{13}$ を満足することを特徴とする。

【0074】また、本発明に係る他の光素子（請求項3）は、量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、前記量子構造の伝導帯に形成されたエネルギー準位の中から二つ準位を選び上から順に第1の準位および第2の準位、前記量子構造の価電子帯に形成されたエネルギー準位の中から選んだ1つの準位を第3の準位としたときに、第2の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記固体中の量子構造の総数をN個として個々の量子構造の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ （ $i=1\sim N$ ）とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12}=\{(1/N)\sum$

24

$[\omega_{12}(i)-\langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13}=\{(1/N)\sum[\omega_{13}(i)-\langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23}=\{(1/N)\sum[\omega_{23}(i)-\langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{12}\leq\sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12}\leq\sigma_{23}$ を満足することを特徴とする。

【0075】また、本発明に係る他の光素子（請求項4）は、量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、前記量子構造の材料が半導体の場合は、前記量子構造の伝導帯に形成されたエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位とし、前記量子構造の材料が金属の場合は、前記量子構造のフェルミ準位よりも高エネルギーのエネルギー準位の中から二つ準位を選び上から順に第1の準位および第2の準位、かつ前記量子構造のフェルミ準位よりも低エネルギーのエネルギー準位の中から選んだ1つの準位を第3の準位としたときに、第1の準位と第2の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備えており、前記固体中の量子構造の総数をN個として個々の量子構造の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ （ $i=1\sim N$ ）とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12}=\{(1/N)\sum[\omega_{12}(i)-\langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13}=\{(1/N)\sum[\omega_{13}(i)-\langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23}=\{(1/N)\sum[\omega_{23}(i)-\langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{23}\leq\sigma_{12}$ 、且つ $\sigma_{23}\leq\sigma_{13}$ を満足することを特徴とする。

【0076】また、本発明に係る他の光素子（請求項5）は、量子井戸、量子細線および量子箱の少なくとも一つの量子構造を有する固体と、前記量子構造の材料が半導体の場合は、前記量子構造の価電子帯に形成されたエネルギー準位の中から三つ準位を選び上から順に第1の準位、第2の準位および第3の準位とし、前記量子構造の材料が金属の場合は、前記量子構造のフェルミ準位よりも高エネルギーのエネルギー準位の中から選んだ1つの準位を第1の準位、かつ前記量子井戸のフェルミ準位よりも低エネルギーのエネルギー準位の中から二つ準位を選び上から順に第2の準位および第3の準位としたときに、第2の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第1の光、ならびに第1の準位と第3の準位との間のエネルギー差に対応する波長を有する第2の光を前記固体中で共存させる励起手段とを備

25

えており、前記固体中の量子構造の総数をN個として個々の量子構造の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーおよび第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギーをそれぞれ $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ ($i=1\sim N$)とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の平均値をそれぞれ $\langle\omega_{12}\rangle$ 、 $\langle\omega_{13}\rangle$ および $\langle\omega_{23}\rangle$ とし、N個全ての量子構造についての前記 $\omega_{12}(i)$ 、 $\omega_{13}(i)$ および $\omega_{23}(i)$ の標準偏差をそれぞれ $\sigma_{12}=\{(1/N)\sum[\omega_{12}(i)-\langle\omega_{12}\rangle]^2\}^{1/2}$ 、 $\sigma_{13}=\{(1/N)\sum[\omega_{13}(i)-\langle\omega_{13}\rangle]^2\}^{1/2}$ および $\sigma_{23}=\{(1/N)\sum[\omega_{23}(i)-\langle\omega_{23}\rangle]^2\}^{1/2}$ とした場合に、 $\sigma_{12}\leq\sigma_{13}$ 、且つ $\sigma_{12}\leq\sigma_{23}$ を満足することを特徴とする。

【0077】ここで、量子構造の量子井戸、量子細線、量子箱には半導体または金属、量子構造の量子障壁には半導体または絶縁体を用い、量子障壁にドナー性不純物あるいはアクセプタ性不純物を選択的にドーピングすることにより、量子構造に電子あるいは正孔を注入することが好ましい。なお、光照射や電流注入などの手段により量子構造に電子あるいは正孔を注入しても良い。

【0078】具体的に、本発明（請求項18～請求項25）における量子井戸、量子細線、量子箱に関しては、B、C、N、O、Mg、Al、Si、P、S、Mn、Zn、Ga、Ge、As、Se、Cd、In、Sn、Sb、TeおよびHgの少なくとも一種類以上の元素からなる半導体材料、またはAl、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Zr、Nb、Mo、Ru、Rh、Pd、Cd、Ag、Hf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Auやこれらの合金などの金属材料を用いることができる。

【0079】量子障壁に関しては、B、C、N、O、Mg、Al、Si、P、S、Mn、Zn、Ga、Ge、As、Se、Cd、In、Sn、Sb、TeおよびHgの少なくとも一種類以上の元素からなる半導体材料、またはLiF、NaF、KF、RbF、CsF、MgF₂、CaF₂、SrF₂、BaF₂、MnF₂、ZnF₂、CdF₂、AlF₃、YF₃、LaF₃、CeF₃、PrF₃、NdF₃、SmF₃、EuF₃、GdF₃、TbF₃、DyF₃、HoF₃、ErF₃、TmF₃、YbF₃、LuF₃、LiBaF₃、KMgF₃、KMnF₃、KZnF₃、KNiF₃、RbNiF₃、ZrF₄、LiYF₄、NaYF₄、KYF₄、LiLaF₄、LiGdF₄、LiLuF₄、BaAlF₅、SrAlF₅、K₃YF₆、K₃CoF₆、Cs₃NdF₇、Cs₃GdF₇、LiCl、NaCl、KCl、RbCl、CsCl、YCl₃、LaCl₃、CeCl₃、PrCl₃、NdCl₃、SmCl₃、EuCl₃、GdCl₃、TbCl₃、DyCl₃、HoCl

26

13、ErCl₃、TmCl₃、YbCl₃、LuCl₃、CsMgCl₃、CsCdCl₃、LiBr、NaBr、KBr、RbBr、CsBr、YBr₃、LaBr₃、CeBr₃、PrBr₃、NdBr₃、SmBr₃、EuBr₃、GdBr₃、TbBr₃、DyBr₃、HoBr₃、ErBr₃、TmBr₃、YbBr₃、LuBr₃、CsMgBr₃、LiI、NaI、KI、RbI、CsI、CuCl、CuBr、CuI、AgF、AgCl、AgBr、AgI、YOCl、LaOCl、LaOBr、TiCl、TiBr、TlI、InBr、InI、Li₂O、BeO、N₂O₅、Na₂O、P₂O₃、S₂O₃、K₂O、CaO、Cr₂O₃、MnO₂、CoO、NiO、SrO、ZrO₂、Nb₂O₅、MoO₃、AgO、Sb₂O₃、TeO₂、BaO、WO₃、Re₂O₇、PbO、PuO₂、Y₂O₃、La₂O₃、Ce₂O₃、Pr₂O₃、Nd₂O₃、Sm₂O₃、Eu₂O₃、Gd₂O₃、Tb₂O₃、Dy₂O₃、Ho₂O₃、Er₂O₃、Tm₂O₃、Yb₂O₃、Lu₂O₃、ThO₂、UO₂、UO₃、Ba₂GdNbO₅、SrGdGa₃O₇、Sc₂Gd₃Ga₃O₁₂、NaLuO₁₂、LiIO₃、LiNbO₃、LiTaO₃、Ba₂NaNb₅O₁₅、Y₂O₂S、La₂O₂S、Ce₂O₂S、Pr₂O₂S、Nd₂O₂S、Sm₂O₂S、Eu₂O₂S、Gd₂O₂S、Tb₂O₂S、Dy₂O₂S、Ho₂O₂S、Er₂O₂S、Tm₂O₂S、Yb₂O₂S、Lu₂O₂S、Y₂S₃、La₂S₃、Ce₂S₃、Pr₂S₃、Nd₂S₃、Sm₂S₃、Eu₂S₃、Gd₂S₃、Tb₂S₃、Dy₂S₃、Ho₂S₃、Er₂S₃、Tm₂S₃、Yb₂S₃、Lu₂S₃、B₂O₃、GaBO₃、InBO₃、TiBO₃、ScBO₃、YBO₃、LaBO₃、CeBO₃、PrBO₃、NdBO₃、SmBO₃、EuBO₃、GdBO₃、TbBO₃、DyBO₃、HoBO₃、ErBO₃、TmBO₃、YbBO₃、LuBO₃、CaYBO₄、BaB₂O₄、Cd₂B₂O₅、LiB₃O₅、CsB₃O₅、SrB₄O₇、Al₃TbB₄O₁₂、ZnO、ZnGa₂O₄、MgO、MgGa₂O₄、Mg₂TiO₄、Mg₄Ta₂O₉、TiO₂、CaTiO₃、SrTiO₃、BaTiO₃、PbTiO₃、KTiPO₅、Al₂O₃、LiAlO₂、YAlO₃、BeAl₂O₄、MgAl₂O₄、ZnAl₂O₄、LiAl₅O₈、Y₄Al₂O₉、YAl₃B₄O₁₂、Y₃Al₅O₁₂、La₃Al₅O₁₂、Ce₃Al₅O₁₂、Pr₃Al₅O₁₂、Nd₃Al₅O₁₂、Sm₃Al₅O₁₂、Eu₃Al₅O₁₂、Gd₃Al₅O₁₂、Tb₃Al₅O₁₂、Dy₃Al₅O₁₂、Ho₃Al₅O₁₂、Er₃Al₅O₁₂、Tm₃Al₅O₁₂、Yb₃Al₅O₁₂、Lu₃Al₅O₁₂、LaAl₁₁O₁₈、CeMgAl₁₁O₁₉、TbMgAl₁₁O₁₉、BaAl₁₂O₁₉、BaMg₂Al

27

16O_{27} , Fe_2O_3 , $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{La}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Pr}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Nd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Yb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Ce}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Pr}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Eu}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Dy}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Ho}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Er}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Tm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Yb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Lu}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, CaPO_3 , ScPO_4 , YPO_4 , LaPO_4 , CePO_4 , PrPO_4 , NdPO_4 , SmPO_4 , EuPO_4 , GdPO_4 , TbPO_4 , DyPO_4 , HoPO_4 , ErPO_4 , TmPO_4 , YbPO_4 , LuPO_4 , $\text{Ca}_2\text{PO}_4\text{Cl}$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mg}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, $\text{Mg}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, $\text{Ba}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$, $\text{Ba}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$, $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$, SiO_2 , BeSiO_3 , MgSiO_3 , CaSiO_3 , SrSiO_3 , BaSiO_3 , ZnSiO_3 , CdSiO_3 , Zn_2SiO_4 , NaYSiO_4 , Y_2SiO_5 , La_2SiO_5 , Lu_2SiO_5 , BeSi_2O_5 , MgSi_2O_5 , CaSi_2O_5 , SrSi_2O_5 , BaSi_2O_5 , $\text{Sc}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, $\text{Be}_2\text{SrSi}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, Si_3N_4 , GeO_2 , Zn_2GeO_4 , $\text{Cs}_2\text{UO}_2\text{F}_4$, $\text{Cs}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$, $\text{Cs}_2\text{UO}_2\text{Br}_4$, $\text{Cs}_3\text{UO}_2\text{F}_5$, $\text{Cs}_3\text{UO}_2\text{Cl}_5$, $\text{Cs}_3\text{UO}_2\text{Br}_5$, MgWO_4 , CaWO_4 , SrWO_4 , BaWO_4 , AlWO_4 , CdWO_4 , PbWO_4 , Y_2WO_6 , MgMoO_4 , CaMoO_4 , SrMoO_4 , BaMoO_4 , Li_2MoO_4 , $\text{Y}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{La}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Ce}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Pr}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Nd}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Sm}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Eu}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Gd}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Tb}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Dy}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Ho}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Er}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Tm}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Yb}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Lu}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, NaCaVO_4 , ScVO_4 , YVO_4 , $\text{Mg}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Sr}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Ba}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Zn}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Cd}_3(\text{VO}_4)_2$, $\text{Mg}_5(\text{VO}_4)_3\text{F}$, $\text{Mg}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$, $\text{Ca}_5(\text{VO}_4)_3\text{F}$, $\text{Ca}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$, $\text{Sr}_5(\text{VO}_4)_3\text{F}$, $\text{Sr}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$, $\text{Ba}_5(\text{VO}_4)_3\text{F}$, $\text{Ba}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$, CaS , SrS , BaS , CaSe , SrSe , BaSe , あるいはフッ化物

28

・ハロゲン化物・臭化物・ヨウ化物・ハロゲン化銅・ハロゲン化銀・酸ハロゲン化物・タリウム化合物・インジウム化合物・ホウ酸塩・亜鉛酸化物・マグネシウム酸化物・チタニウム酸化物・アルミン酸塩・ガーネット・ケイ酸塩・ゲルマニウム酸塩・イットリウム化合物・ランタン化合物・セリウム化合物・プラセオジウム化合物・ネオジウム化合物・サマリウム化合物・ユーロピウム化合物・ガドリニウム化合物・テルビウム化合物・ジスプロシウム化合物・ホルミウム化合物・エルビウム化合物・ツリウム化合物・イッテルビウム化合物・ルテチウム化合物・ウラン化合物・リン酸塩・シェーレ化合物・硫化物・セレン化合物などの絶縁性無機材料を用いることができる。

【0080】また、本発明において、光照射手段による第1、第2の光は、コヒーレント光、すなわちレーザー光が好ましい。レーザーの種類については、用いたい電子遷移と波長が合えば特に限定されないが、小型素子の形成に有利な半導体レーザーを用いることが望ましい。

【0081】【作用】本発明者等の研究によれば、固体中のエネルギー準位に大きなバラつきが有る場合、つまり、光励起を行う準位間のエネルギーに大きな分散（標準偏差）が有る場合でも、請求項1～請求項3、請求項22～請求項25の標準偏差に係る条件式を満足すれば、量子コヒーレンスを背景としたEITに基づく大きな光変調特性が得られることが明らかになった。したがって、本発明（請求項1～請求項15、請求項22～請求項25）によれば、固体におけるEITに立脚した実用可能な光素子を提供できるようになる。

【0082】また、本発明者等の研究によれば、固体中のエネルギー準位に大きなバラつきが有る場合でも、光素子を構成する固体として特定のものを使用することにより、つまり、本発明の固体を使用することにより、量子コヒーレンスを背景としたEITに基づく大きな光変調特性が得られることが明らかになった。したがって、本発明（請求項16～請求項21）によれば、固体におけるEITに立脚した実用可能な光素子を提供できるようになる。

【0083】以下、本発明の作用について詳細に説明する。

【0084】従来の技術の項目で説明したように、固体においてEITを実現するにはバンドを形成するような準位を用いることは困難である。すなわち、固体においてEITを実現するには、原子ガスの場合と同様に離散的なエネルギー準位を持つ系を選ぶ必要が有る。

【0085】固体への適用条件としてはこの他に、準位構成が単純で3準位系を設定することが可能であること、また光励起過程の中で電子が3準位の外に逃げ出さない閉じた系であることなどが挙げられる。

【0086】これより、本発明に係る光素子に用いる固体の候補としては、結晶中に分散された希土類元素や遷

移金属元素などの不純物原子系や、上述した半導体超格子などの量し井戸に加え同じく半導体の量子細線、量子箱が考えられる。

【0087】エネルギー準位にこのような特徴（離散的なエネルギー準位を持つ系の選択、単純な準位構成で3準位系の設定が可能なこと、電子が3準位の外に逃げ出さない閉じた系であること）を持つ固体は、一種の擬原子の集まりと見なすことができる。しかし、この擬原子系の候補である半導体超格子などの量子構造や、結晶中の不純物、欠陥などでは、現在のところ原子ガスで見られたような顕著な光学遷移の変調には成功していない。

【0088】これは、半導体超格子などの量子構造や不純物、欠陥などのエネルギー準位が原子ガスと比較して大きく、しかもランダムにバラついているため、EITを引き起こす鍵である条件； $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ （ Λ 型励起とV型励起の場合）または $\Delta\omega_1 = -\Delta\omega_2$ （ Ξ 型励起の場合）を満足する準位数が著しく少なくなっていることに起因する。

【0089】このことから、固体でEITを実現するには、先に挙げた適用条件の他に、さらにエネルギー準位の均一性に関する条件が付け加わることが理解される。

【0090】図3は、離散的なエネルギー準位を持つ擬原子系の固体について、光吸収スペクトルを模式的に表したものである。

【0091】一般的に、離散的な準位を持つ擬原子系の固体を選択しても、光吸収スペクトルの線幅は原子ガスと比較してかなり広がる。この広いスペクトル線幅は、多くの場合不均一広がりによって由来する。

【0092】不均一広がりとは、図3（a）に示すようにエネルギー準位が個々の擬原子で少しずつずれているが、それが完全に分解できる程には離れていないため、多数の擬原子のスペクトルが重なり1本の広がったスペクトル線として見える場合を指す。

【0093】この広がりはおもに、固体内、特に結晶内*

$$\omega_1 - \omega_{12}(i) = \omega_2 - \omega_{13}(i) \quad (1a)$$

$$\omega_1 - \omega_{12}(j) = \omega_2 - \omega_{13}(j) \quad (1b)$$

となる。

【0098】ここで、光で結ばれない準位2・準位3間の準位間エネルギー ω_{23} は、 $\omega_{23} = \omega_{13} - \omega_{12}$ と表され ※

$$\omega_{23}(i) = \omega_{23}(j)$$

つまり、2個の擬原子で同時に $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満足させて完全な光吸収ゼロの状態を引き起こすためには、一番上の準位1のエネルギー準位には依存せず、準位2、準位3の下2つの準位間エネルギー ω_{23} が2個の擬原子で等しいことが条件となる。

$$\Delta\omega_{23} = 0$$

が得られる。

【0101】（3）式は、光吸収を完全にゼロにするための厳密な条件である。しかし、上式のような完全な条件ではない $\Delta\omega_{23} \neq 0$ の場合でも、光吸収ゼロの状態を

*の歪みなどにより結晶内の個々の擬原子が受ける結晶場の大きさがバラつくため、擬原子全体で見た場合に準位間エネルギーが分散していることに起因する。先に挙げた全ての擬原子系に関しても、程度の差こそあれ準位間エネルギーのバラつきは存在する。

【0094】図3（b）は、擬原子系の中から準位間エネルギーが大きく、かつランダムに分散した3準位系を選び出し、図2（a）に示した原子ガスと同様、2本のレーザー光を照射したときの光吸収スペクトルを模式的に表したものである。

【0095】図3（b）から、スペクトル形状は通常の1本の光で見た場合とあまり大差なく、光学遷移はほとんど変調されないことが分かる。これより、不均一広がり、すなわち準位間エネルギーの分布を十分に考慮した上で光励起を行う準位を選ばなければ、どの擬原子系においてもEITを実現することはできない。

【0096】以下に、EITに基づく光吸収スペクトルの変調特性が、擬原子系の準位間エネルギーの分布特性、特に準位間エネルギーの標準偏差に依存してどの様に変化するかを、 Λ 型励起、V型励起および Ξ 型励起のそれぞれの場合について示す。なお、ここでは不均一広がりを表す典型的な量として準位間エネルギーの標準偏差を用いることにする。また、以下の説明では、準位1（第1の準位）>準位2（第2の準位）>準位3（第3の準位）の順にエネルギーが高いとする。

【0097】（1） Λ 型励起の場合（請求項1、請求項16、請求項18などの場合）

まず、2個の擬原子 i, j について考える。準位1・準位2間、準位1・準位3間に光子エネルギー ω_1, ω_2 という2本のレーザー光を照射する状態を想定する。ここで、光子エネルギー ω_1, ω_2 と準位間エネルギー ω_{12}, ω_{13} との差をそれぞれ $\Delta\omega_1 = \omega_1 - \omega_{12}, \Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_{13}$ とすると、この2個の擬原子が同時に $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満たす条件は、

※るため、（1）式は次のように書き直すことができる。

【0099】

$$(2)$$

★【0100】擬原子間の準位間エネルギーの差を $\Delta\omega_{12} = |\omega_{12}(i) - \omega_{12}(j)|, \Delta\omega_{13} = |\omega_{13}(i) - \omega_{13}(j)|, \Delta\omega_{23} = |\omega_{23}(i) - \omega_{23}(j)|$ とすると、（2）式を満たす $\Delta\omega_{12}, \Delta\omega_{13}, \Delta\omega_{23}$ の条件としては、

$$(3)$$

作り出すことができる。

【0102】具体的には、 $\Delta\omega_{23}$ が2本の光のラビ周波数 Ω_{12}, Ω_{13} で決まる量 $\Omega \sim (\Omega_{12}^2 + \Omega_{13}^2)^{1/2}$ と同程度であれば、吸収スペクトルにはやはり幅 Ω の透明

31

領域が形成される。

【0103】このことから、2個の擬原子を含む系を Λ *

$$\Delta\omega_{23} \sim \Omega$$

を満足することが、光透過特性の向上に著しく寄与する。

【0104】次に、N個の擬原子で同時に光吸収ゼロを※

$$\omega_{23}(1) = \omega_{23}(2) = \omega_{23}(3) = \dots = \omega_{23}(N) \quad (5)$$

である。

【0105】N個の擬原子で同時に光吸収ゼロの状態を引き起こすためには、一番上の準位1のエネルギー準位には依存せず、準位2、準位3の下2つの準位間エネルギー ω_{23} がN個の擬原子で等しいことが条件となる。

【0106】しかし、N個の擬原子の場合にも、(5) ★

$$\sigma_{12} = \{ (1/N) \sum [\omega_{12}(k) - \langle \omega_{12} \rangle]^2 \}^{1/2} \quad (6a)$$

$$\sigma_{13} = \{ (1/N) \sum [\omega_{13}(k) - \langle \omega_{13} \rangle]^2 \}^{1/2} \quad (6b)$$

$$\sigma_{23} = \{ (1/N) \sum [\omega_{23}(k) - \langle \omega_{23} \rangle]^2 \}^{1/2} \quad (6c)$$

を導入する。

【0108】 Ω と σ_{12} 、 σ_{13} 、 σ_{23} との関係については、 Ω がスペクトル上で光吸収がゼロになるエネルギー幅、 σ_{12} 、 σ_{13} が各々の遷移のスペクトル線幅に対応することから、 $\Omega \leq \sigma_{12}$ 、 $\Omega \leq \sigma_{13}$ がそれぞれ成立する。 ☆

$$\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$$

$$\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$$

図4は、多数の擬原子で同時に光吸収ゼロを実現するための条件を模式的に示したものである。なお、図の縦軸は ω_1 、横軸は ω_2 で、図中の点は各擬原子の準位1・準位2間、準位1・準位3間のエネルギー差 ω_{12} 、 ω_{13} を表す。

【0111】図4(a)に示すように、各擬原子で ω_{23} の分散が小さく、準位間エネルギー ω_{12} 、 ω_{13} が

(ω_1 、 ω_2)平面上で45度ラインに沿って分布する場合、2本のレーザー光により擬原子全体で同時に光吸収ゼロの状態を実現することができる。

【0112】すなわち、 $\omega_2 - \omega_1$ と ω_{23} とが等しければ、準位1・準位2間、準位1・準位3間にどの様に大きなエネルギー分散が有る場合でも、光を完全に透過させることができる。

【0113】また、上の条件； $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{23}$ は光子エネルギー ω_1 、 ω_2 の絶対値には依存しないため、光吸収ゼロの状態をあらゆる光子エネルギー ω_1 、 ω_2 で引き起こすことができる。

【0114】さらに、図4(b)に示すように ω_{23} に分布がある場合でも、(ω_1 、 ω_2)平面上で準位間エネルギー ω_{12} 、 ω_{13} が45度ラインに分布している領域が ◆

$$\omega_1 - \omega_{23}(m) = \omega_2 - \omega_{13}(m) \quad (8a)$$

$$\omega_1 - \omega_{23}(n) = \omega_2 - \omega_{13}(n) \quad (8b)$$

となる。

【0119】光で結ばれない準位1・準位2間の準位間エネルギー ω_{12} は、 $\omega_{12} = \omega_{13} - \omega_{23}$ と表されるため、

(8)式は次のように書き直すことができる。

32

*型励起した場合、 $\Delta\omega_{23}$ が次の条件式、

(4)

※実現するための条件を考える。N個の擬原子が同時に $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満たす条件は、厳密には、

★式が厳密に成立していなくとも、以下のような条件が成り立てば光吸収ゼロの状態を作り出すことができる。

【0107】ここで、N個の擬原子に関する各準位間エネルギーの平均値を $\langle \omega_{12} \rangle$ 、 $\langle \omega_{13} \rangle$ 、 $\langle \omega_{23} \rangle$ として、各準位間エネルギーの標準偏差、

☆【0109】この式と(4)、(5)式とから、N個の擬原子が同時に $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満足する条件は、次の式で与えられる。

【0110】

(7a)

(7b)

◆一部でも存在すれば、その領域のエネルギー ω_{12} 、 ω_{13} と等しい光子エネルギー ω_1 、 ω_2 の光に対しては、やはり光吸収ゼロの状態を作り出すことが可能となる。

【0115】これより、多数の擬原子を含む系においても、(7)式の $\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ 、 $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足することが、光シグナルの変調特性向上に著しく寄与することが理解される。

【0116】(2) V型励起の場合(請求項2、請求項17、請求項19などの場合)

V型励起は、 Λ 型励起とは異なり $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満足しても光吸収は厳密にはゼロとはならず、ゼロに限りなく近い値を示す点の特徴である。

【0117】まず、 Λ 型励起の場合と同様に、2個の擬原子m、nについて、準位2・準位3間、準位1・準位3間に光子エネルギー ω_1 、 ω_2 という2本のレーザー光を照射する状態から考える。

【0118】光子エネルギー ω_1 、 ω_2 と準位間エネルギー ω_{23} 、 ω_{13} との差をそれぞれ $\Delta\omega_1 = \omega_1 - \omega_{23}$ 、 $\Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_{13}$ とすると、2個の擬原子が同時に $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満たす条件は、

【0120】このように固体において Λ 型励起でEITを実現するには、準位1・準位2間の準位間エネルギーの分布が小さい系を選択することが不可欠である。

【0121】

33

$$\omega_{12}(m) = \omega_{12}(n)$$

上式より、2個の擬原子で同時に $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満足させて光吸収をゼロの状態に近づけるには、準位間エネルギー ω_{23} 、 ω_{13} には依らず、上2つの準位間エネルギー *

$$\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$$

$$\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$$

が得られる。

【0123】図5は、V型励起の場合において、多数の擬原子が同時に光吸収ゼロに近づくための、擬原子のエネルギー分布を模式的に示したものである。なお、図の縦軸は ω_1 、横軸は ω_2 で、図中の点は各擬原子の準位2・3間、準位1・3間のエネルギー差 ω_{23} 、 ω_{13} を表す。

【0124】図5(a)に示すように、各擬原子で ω_{12} の分散が小さく、準位間エネルギー ω_{23} 、 ω_{13} が(ω_1 、 ω_2)平面上で45度ラインに沿って分布する場合、2本のレーザー光により擬原子全体で同時にほぼ光吸収ゼロの状態を実現することができる。

【0125】また、図5(b)に示すように、 ω_{12} に分散がある場合でも、(ω_1 、 ω_2)平面上で準位間エネルギー ω_{23} 、 ω_{13} が45度ラインに分布している領域が一部でも存在すれば、その領域のエネルギー ω_{23} 、 ω_{13} と等しい ω_1 、 ω_2 の光に対しては、やはり光がほぼ完 ※

$$\omega_1 - \omega_{12}(p) = -\omega_2 + \omega_{23}(p) \quad (11a)$$

$$\omega_1 - \omega_{12}(q) = -\omega_2 + \omega_{23}(q) \quad (11b)$$

となる。

【0129】光で結ばれない準位1・準位3間の準位間エネルギー ω_{13} は、 $\omega_{13} = \omega_{12} + \omega_{23}$ と表されるため、 ★

$$\omega_{13}(p) = \omega_{13}(q) \quad (12)$$

上式より、2個の擬原子で同時に $\Delta\omega_1 = -\Delta\omega_2$ を満足させて光吸収をゼロの状態に近づけるには、準位間エネルギー ω_{12} 、 ω_{23} には依らず、一番上と一番下の準位間エネルギー ω_{13} が2個の擬原子で等しいことが条件と ☆

$$\sigma_{13} \leq \sigma_{12}$$

$$\sigma_{13} \leq \sigma_{23}$$

が得られる。

【0132】図6は、E型励起の場合において、多数の擬原子が同時に光吸収ゼロに近づくための、擬原子のエネルギー分布を模式的に示したものである。なお、図の縦軸は ω_1 、横軸は ω_2 で、図中の点は各擬原子の準位1・2間、準位2・3間のエネルギー差 ω_{12} 、 ω_{23} を表す。

【0133】図6(a)に示すように、各擬原子で ω_{13} の分散が小さく、準位間エネルギー ω_{12} 、 ω_{23} が(ω_1 、 ω_2)平面上で45度ラインの垂直方向に分布する場合、2本のレーザー光により擬原子全体で同時にほぼ光吸収ゼロの状態を実現することができる。

【0134】また、図6(b)に示すように、 ω_{13} に分散がある場合でも、(ω_1 、 ω_2)平面上で準位間エネルギー ω_{12} 、 ω_{23} が45度ラインと垂直に分布する領域

34

(9)

* ω_{12} が2個の擬原子で等しいことが条件となる。

【0122】以下、 Λ 型励起の場合と同様な議論により、N個の擬原子が同時に吸収ゼロとなる条件として、

$$(10a)$$

$$(10b)$$

※全に透過する状態を作り出すことができる。このように固体においてV型励起でEITを実現するには、準位1・準位2間の準位間エネルギーの分布が小さい系を選択することが不可欠となる。

【0126】(3) E型励起の場合(請求項3の場合) E型励起の特徴は、 Λ 型励起やV型励起とは異なり $\Delta\omega_1 = -\Delta\omega_2$ を満足するときに光吸収がゼロに限りなく近い値を示す点である。

【0127】まず、先の二つの励起の場合と同様に、2個の擬原子p、qについて、準位1・準位2間、準位2・準位3間に光子エネルギー ω_1 、 ω_2 という2本のレーザー光を照射する状態から考える。

【0128】光子エネルギー ω_1 、 ω_2 と準位間エネルギー ω_{12} 、 ω_{23} との差をそれぞれ $\Delta\omega_1 = \omega_1 - \omega_{12}$ 、 $\Delta\omega_2 = \omega_2 - \omega_{23}$ とすると、2個の擬原子が同時に $\Delta\omega_1 = -\Delta\omega_2$ を満たす条件は、

★(14)式は次のように書き直すことができる。

$$[0130]$$

30 ☆なる。

【0131】以下、やはり Λ 型と同様な議論により、N個の擬原子が同時に光吸収ゼロとなる条件として、

$$(13a)$$

$$(13b)$$

が一部でも存在すれば、その領域のエネルギー ω_{12} 、 ω_{23} と等しい ω_1 、 ω_2 の光に対しては、やはり光がほぼ完全に透過する状態を作り出すことが可能となる。このように固体においてE型励起でEITを実現するには、準位1・準位3間の準位間エネルギーの分布が小さくなる系を選択することが不可欠である。

【0135】以上、 Λ 型、V型、E型励起のそれぞれの場合について、擬原子系のEIT特性が準位間エネルギーの標準偏差に依存してどの様に変化するか、特にある特定のエネルギー分布を持つ場合には不均一広がり有無によらず完全EITが発現することを述べた。

【0136】そこで、今度は(ω_1 、 ω_2)平面上でこのような特定のエネルギー分布を持った材料系を選び出す方法、あるいはこのような分布を持った材料系を作り出す方法が重要となる。

35

【0137】以下に、先に挙げた擬原子系の中で、不純物原子系を用いて特定のエネルギー分布を持った系を選び出す方法（請求項1～15）、量子構造を用いて特定の分布を持った系を選び出す方法（請求項22～25）、そして電場や磁場や圧力などの外場を用いて特定の分布を持った系を作り出す方法（請求項16～21）について説明する。

【0138】（A）不純物原子系でのEIT

先にも述べたように、固体においてEITを実現するには、 Λ 型励起では準位2・3間の準位間エネルギー分布が小さい系、V型では準位1・2間の分布が小さい系、 Ξ 型では準位1・3間の分布が小さい系を選択することが不可欠である。

【0139】ここで、田辺・菅野によるエネルギー準位の計算で知られる遷移金属イオンのd→d遷移に注目する。

【0140】この遷移では、各準位はその対称性により結晶場の大きさを変えた時にエネルギー準位がほとんど変化しないものと、それが大きく変化するものとに大別される。

【0141】さらに、結晶場に強く依存する準位ではスペクトルにおける不均一広がりが大きく、逆に変化が小さい準位では不均一広がりも小さくなることが知られている。これは、d→d遷移では不均一広がり結晶場の揺らぎに由来することを表している。

【0142】擬原子系の一つに挙げた希土類イオンのf→f、f→d遷移についても、結晶場に対する準位エネルギーの変化に関して同様な解析が行われている。

【0143】これより、準位の対称性を考慮することで準位間エネルギーの分布に関する情報を得ることができる遷移金属イオンや希土類イオンを含む固体材料を用いることにより、初めて Λ 型、V型、 Ξ 型それぞれの励起タイプに最も相応しい3つの準位を設定することが可能となる。

【0144】また、本発明（請求項4～9）では、不純物として特にd電子の数が2～8の遷移金属イオンに注目し、 Λ 型励起の場合（請求項4、5）には第2の準位と第3の準位の電子位置、V型励起の場合（請求項6、7）には第1の準位と第2の準位の電子配置、そして Ξ 型励起の場合（請求項8、9）には第1の準位と第3の準位の電子配置が等しいことを規定している。電子配置の選び方に依存して準位間エネルギーの分布は大きく異なる。この理由は以下に述べる通りである。

【0145】図15に、6個の配位子によって立方対称的に囲まれたd電子を1個持つ遷移金属イオン、つまり、立方対称の結晶場中におかれた遷移金属イオンを模式的に示す。

【0146】結晶場が無く、原子核によるクーロン力場だけが働く場合において、電子スピンまで考慮するとd電子のエネルギー準位は10重に縮退している。一方、

36

結晶場がある場合には、図16に示すように、10重に縮退したエネルギー準位は、6重に縮退した T_{2g} 準位と4重に縮退した E_g 準位とに分裂する。すなわち、d電子を1個持つ遷移金属イオンは、立方対称の結晶場におかれると、縮退が部分的に解けて、基底状態の T_{2g} 準位と励起状態の E_g 準位とに分裂する。

【0147】なお、結晶場による準位分裂の大きさは $10Dq$ で表される。ここで、 D は $35e/(4a)^5$ 、 q は $q=(2e/105)<r>^4$ で定義される結晶場特有の量を意味しており、また、 e は素電荷、 a は遷移金属イオンと配位子の距離、 $<r>^4$ は下式で表されるd動径関数、 $R_d(r)$ での r^4 の平均値を意味している。また、図16中の記号 T_{2g} 、 E_g は準位対称性を表す既約表現である。

【0148】

【数1】

$$<r>^4 = \int |R_d(r)|^2 r^4 \cdot r^2 dr$$

【0149】ここで、分裂した各準位の波動関数に注目すると、 T_{2g} 準位は6重縮退であるため波動関数は6個、また E_g 準位は4重縮退であるため波動関数は4個存在する。一般に、 T_{2g} 準位の固有状態である6個の波動関数を合わせて t_{2g} 軌道、また E_g 準位の固有状態である4個の波動関数を合わせて e_g 軌道と呼ぶ。

【0150】 n 個（ $n \geq 2$ ）のd電子を持つ遷移金属イオンのエネルギー準位の大きさは、先の1電子の場合の t_{2g} 軌道、 e_g 軌道を用いると、これら軌道に n 個の電子をどう振り分けて配置するか大きく依存する。

【0151】今 $n=2$ として、 t_{2g} 軌道に電子を2個とも収容する電子配置 $(t_{2g})^2$ と、 t_{2g} 軌道、 e_g 軌道にそれぞれ1個ずつ電子を収容する電子配置 $(t_{2g})(e_g)$ を考える。

【0152】まず、電子配置 $(t_{2g})^2$ の場合、6個の t_{2g} 軌道の中から2個の電子が占める軌道を2つ選ぶやり方の数 ${}_6C_2=15$ だけ状態がある。ここで、二つの電子間に働くクーロン相互作用を考えると、電子配置 $(t_{2g})^2$ は図17に示すように四つの準位に分裂する。なお、図17において、 A_{1g} 、 T_{2g} 、 E_g 、 T_{1g} は準位対称性を表す既約表現である。

【0153】この準位分裂で重要な点は、準位分裂の大きさが結晶場分裂に特有な量 $10Dq$ には依存せず、電子間のクーロン相互作用だけで決まることにある。したがって、四つの準位間の準位間エネルギーは、基本的には結晶場の大きさ $10Dq$ が変化しても変わらない。

【0154】また、電子配置 $(t_{2g})(e_g)$ の場合、図18に示すように、四つの準位に分裂する。なお、図18において、 T_{1g} 、 T_{2g} は準位対称性を表す既約表現である。この分裂の大きさもやはり $10Dq$ には依存せず、電子間のクーロン相互作用だけで決まる。したがって、電子配置 $(t_{2g})^2$ の場合と同様に、四つの準位間の準位間エネルギーは、基本的には結晶場の大きさ $10Dq$

37

が変化しても変わらない。

【0155】ここで、電子配置 $(t_{2g})^2$ から電子配置 $(t_{2g})(e_g)$ への遷移を考えると、この遷移は1個の電子を t_{2g} 軌道から e_g 軌道に持ち上げる1電子遷移であるため、同じスピン多重度を持つ準位間では光により $(t_{2g})^2 \rightarrow (t_{2g})(e_g)$ 遷移を引き起こすことができる(スピン許容遷移)。

【0156】したがって、基底状態である電子配置 $(t_{2g})^2$ の³T_{1g}準位(スピン多重度=3)から、電子配置 $(t_{2g})(e_g)$ の³T_{1g}準位、³T_{2g}準位(ともにスピン多重度=3)への光吸収は起こる。

【0157】この遷移は基本的には結晶場で分裂した $t_{2g} \cdot e_g$ 軌道間の遷移であり、準位間エネルギーは結晶場の大きさ10Dqに強く依存する。このため、結晶内に歪みなどがある場合には場所(サイト)ごとに10Dqが揺らぎ、準位間エネルギーは遷移金属イオンごとに大きく異なることが予測される。

【0158】現在の材料系において $(t_{2g})^2 \rightarrow (t_{2g})(e_g)$ 遷移の光吸収を見ると、線幅の広いスペクトルが得られることが多い。このことから、一般に $(t_{2g})^2 \rightarrow (t_{2g})(e_g)$ 遷移は光学的に許容で、しかも準位間エネルギー分布は大きいことが知られている。

【0159】これに対して、基底状態である電子配置 $(t_{2g})^2$ の³T_{1g}準位から同じ電子配置 $(t_{2g})^2$ に属する¹A_{1g}準位、¹E_g準位、¹E_{2g}準位(ともにスピン多重度=1)への遷移を考えると、この遷移ではスピン反転だけが起こることが分かる。このような遷移は光学的に禁止される(スピン禁制遷移)。また、上述したように、同じ電子配置の準位間では準位間エネルギーの大きさ10Dqには依存せず、電子間のクーロン相互作用だけで決まる。これらの点から、一般に同じ電子配置を持つ準位間の遷移は光学的に禁制で、しかも準位間エネルギー分布は小さいことが知られている。

【0160】これにより、 $n=2$ の場合、本発明(請求項4, 6, 8)で規定されている通り、 Λ 型励起においては第2の準位の電子配置と第3の準位の電子配置とが等しく $(t_{2g})^2$ で、第1の準位の電子配置が第2および第3の電子配置と異なり、 $(t_{2g})(e_g)$ である材料系、V型励起においては第1の準位の電子配置と第2の電子配置とが等しく $(t_{2g})(e_g)$ で、第3の準位の電子配置が第1および第2の電子配置と異なり、 $(t_{2g})^2$ である材料系、そして Ξ 型励起では第1の準位の電子配置と第3の電子配置とが等しく $(t_{2g})^2$ で、第2の準位の電子配置が第1および第3の電子配置と異なり、 $(t_{2g})(e_g)$ である材料系を選択することにより、基底状態にある材料系についてはそのまま本発明(請求項1~請求項3)の条件式を実現することができる。

【0161】 $n=3 \sim 8$ の場合についても、 $n=2$ の場

38

合と同様に、本発明(請求項4~9)で規定されている通り、 Λ 型励起においては第2の準位の電子配置と第3の準位の電子配置とが等しく第1の準位の電子配置が第2および第3の電子配置と異なる材料系、V型励起においては第1の準位の電子配置と第2の電子配置とが等しく第3の準位の電子配置が第1および第2の電子配置と異なる材料系、そして Ξ 型励起では第1の準位の電子配置と第3の電子配置とが等しく第2の準位の電子配置が第1および第3の電子配置と異なる材料系を選択することにより、本発明(請求項1~請求項3)の条件式を実現することができる。

【0162】また、本発明(請求項10~請求項15)では、不純物として特にf電子の数 n が $n=1 \sim 13$ の希土類イオンに注目し、 Λ 型励起の場合には準位2と準位3は等しい電子配置 $(f)^n$ をとり、準位1はそれと異なる電子配置 $(f)^{n-1}(d)$ をとること、V型励起の場合には準位1と準位2が等しい電子配置 $(f)^n(d)$ をとり、準位3がそれと異なる電子配置 $(f)^n$ をとることをそれぞれを規定した。

【0163】電子配置 $(f)^n$ と電子配置 $(f)^{n-1}(d)$ とを織り交ぜて3準位を選ぶ場合、その選び方に依存して準位間エネルギーの分布は大きく変化するが、これは以下に述べるような理由による。

【0164】現実の材料系において、 $(f)^n \rightarrow (f)^n$ 遷移、 $(f)^{n-1}(d) \rightarrow (f)^{n-1}(d)$ 、先 $(d)^n \rightarrow (d)^n$ 遷移は結晶場に対する対称性が異なる準位間では一般に許容遷移となり、しかも準位間エネルギー分布は大きい、対称性が等しいかまたは類似した準位間では禁制遷移となり、準位間エネルギー分布は小さいことが知られている。

【0165】これに対して $(f)^n \rightarrow (f)^{n-1}(d)$ 遷移は一般に許容遷移であり、さらに遷移金属イオンと同様にd電子軌道が関与するため、結晶場の揺らぎを反映して準位間エネルギー分布は大きいことが知られている。

【0166】ところで、 $(f)^n \rightarrow (f)^{n-1}(d)$ 遷移の光励起に関する振動子強度と、 $(f)^n \rightarrow (f)^n$ 遷移の中でも、特に光学許容となる準位対称性の異なった2準位間での振動子強度とを比較すると、一般には、 $(f)^n \rightarrow (f)^{n-1}(d)$ 遷移のほうが何桁も大きくなる。

【0167】このため、電子配置 $(f)^n$ と電子配置 $(f)^{n-1}(d)$ を織り交ぜて3準位を選ぶ場合には、特に電子配置 $(f)^n$ の準位対称性を考慮しなくても、 $(f)^n \rightarrow (f)^n$ 遷移は $(f)^n \rightarrow (f)^{n-1}(d)$ 遷移と比較して、十分に光学禁制で準位間エネルギー分布も小さい。

【0168】このことから、 Λ 型励起では、準位2, 3に電子配置 $(f)^n$ の中から2準位、準位1に電子配置 $(f)^{n-1}(d)$ から一つ準位を選び、V型励起では準位1, 2に電子配置 $(f)^{n-1}(d)$ の中から2準位、準位3に電子配置 $(f)^n$ から一つ準位を選ぶことにより、やはり本発明(請求項1, 2)の条件式を実現することが可能にな

10

20

30

40

50

39

る。

【0169】(B)量子構造系でのEIT

一方、量子井戸、量子細線、量子箱などの量子構造中に形成されるエネルギー準位は、一般には、そのサイズ、形状、ポテンシャルの深さ等に依存して大きく変化する。

【0170】ここでは、まず、単一量子井戸において電子が取り得るエネルギー準位の大きさを示し、これを基にN個の量子井戸における各エネルギー準位の分布、準位間エネルギーの不均一広がり的大小を示していく。¹⁰

$$E_n = (h^2 / 8m^*) (n/L)^2$$

となる。n番目の準位に注目すると、そのエネルギーはLの値、すなわち量子井戸のサイズに極めて強く依存することがわかる。

【0173】いま、図20のような量子井戸がN個有る状況を考える。この場合、各量子井戸の構造が完全に同じであれば、どの準位についてもエネルギーのバラつきは生じ得ない。

【0174】しかし、現状の半導体プロセスにおける素子作製技術では、まだ原子オーダーでの精密な微細加工は難しい。²⁰

$$\Delta E_n = E_n [4L^3 \cdot \Delta L / (L^2 - \Delta L^2)^2] \quad (15)$$

となる。

【0177】式(15)は、量子数nが大きいエネルギーの高い準位ほど、準位のバラつきが大きくなることを示している。

【0178】次に準位間エネルギーの不均一広がりについて考える。量子数mの準位と量子数nの準位との差を★

$$\Delta E_{nm} = E_{nm} [4L^3 \cdot \Delta L / (L^2 - \Delta L^2)^2] \quad (16)$$

となる。

【0179】式(16)からわかるように、N個の量子井戸における準位間エネルギーの不均一広がり、準位間エネルギーの大きさが増すほど増加する。

【0180】これらの点から、図21(a)、図22(a)、図23(a)に示すように、準位2、準位3に最もエネルギーの低い2準位(量子数の小さい2準位)、準位1にエネルギーの高い準位(量子数の大きな準位)を選択し、また、図21(b)、図22(b)、図23(b)に示すように、準位1、準位2に最もエネルギーの低い2準位(量子数の小さい2準位)、準位3にエネルギーの高い準位(量子数の大きな準位)を選択することによって、初めて請求項1、2の条件式、すなわち、光で結ばれない2準位間の不均一広がりが極めて小さいΛ型またはV型3準位系を設定することが可能になる訳である。

【0181】なお、図21(a)は半導体からなる量子井戸(半導体量子井戸)において、伝導帯から1つ価電子帯から2つ選んだ3準位をΛ型に、同図(b)は半導体量子井戸において、伝導帯から2つ価電子帯から1つ選んだ3準位をV型に励起する場合を示している。

40

*【0171】なお、簡単のために量子井戸としては図20に示すような無限大のポテンシャル障壁に挟まれた1次元量子井戸を対象としたが、これ以外の量子構造、例えば有限のポテンシャルに挟まれた1次元量子井戸や量子細線、量子箱等についても議論の本質は変わらない。

【0172】図20に示した幅Lの量子井戸中での電子状態は、シュレディンガー方程式を用いて求めることができる。量子井戸中に現れるエネルギー準位は、 E_n をエネルギー固有値、nを量子数($n=1, 2, 3, \dots$)、 m^* を電子の有効質量とすると、

$$(14)$$

※【0175】このため、エネルギー準位は実際にはある程度バラつきを持つ。ここで、量子井戸のサイズLが($L+\Delta L$)から($L-\Delta L$)までバラつくとした場合に、n番目の準位エネルギー E_n にどの程度の幅が生じるかを見積もる。

【0176】なお、($L-\Delta L$)における E_n の最大値 $E_n(\max)$ と($L+\Delta L$)における最小値 $E_n(\min)$ との差 ΔE_n が、 E_n の分布の幅を表すものとする。式(14)より、 ΔE_n は、

★ E_{nm} ($n>m$)とし、その分布の幅を考える。上と同様に量子井戸のサイズLが($L+\Delta L$)から($L-\Delta L$)までバラつくとした場合に、 E_{nm} の最大値 $E_{nm}(\max)$ と最小値 $E_{nm}(\min)$ との差 ΔE_{nm} が分布幅を表すものとする、 ΔE_{nm} は、

³⁰ 【0182】また、図22(a)は半導体量子井戸において、伝導帯から選んだ3準位をΛ型に、同図(b)は半導体量子井戸において、価電子帯から選んだ3準位をV型に励起する場合を示している。

【0183】また、図23(a)は金属からなる量子井戸(金属量子井戸)において、フェルミ準位よりも高エネルギー領域に形成された準位の中から2つフェルミ準位よりも低エネルギー領域に形成された準位の中から1つ選んだ3準位をΛ型に、同図(b)は金属量子井戸において、フェルミ準位よりも低エネルギー領域に形成された準位の中から2つフェルミ準位よりも高エネルギー領域に形成された準位の中から1つ選んだ3準位をV型に光励起する場合を占めている。

【0184】なお、図22(a)、図23(a)では、量子障壁の構成材料にドナー性不純物をドーピングすることで量子井戸に電子を注入し、また、図22(b)、図23(b)では、量子障壁の構成材料にアクセプター性不純物をドーピングすることで量子井戸に正孔を注入している。

【0185】(C)外場誘起によるEIT
次に(ω_1, ω_2)平面上でこの様な特定のエネルギー

分布を持った材料系を作り出す方法について説明する。

【0186】この様な手法の一つとして、次に述べるような固体中の擬原子に電場、磁場、圧力などの外場を加えて、3準位のうち光で結ばれない準位間の不均一広がり小さくなるような材料系を作り出す方法がある。

【0187】上述したように、本発明の光素子に用いられる擬原子系としては、結晶中に分散された遷移金属原子や希土類原子などの不純物原子系や、半導体の超格子や量子細線、量子箱などの量子構造が候補になること、また、これらの不純物原子系や量子構造が原子ガスと同様離散的なエネルギー準位を持つことを述べた。

【0188】原子ガスのエネルギー準位については、すでに計算と実験の両面から詳しく調べられており、その中には複数の準位が同じエネルギーを持つ縮退した準位が多数存在することが知られている。

【0189】一方、結晶中に分散された遷移金属原子や希土類原子の不純物準位についても、田辺・菅野らの計算で知られ遷移金属不純物の準位図やG. H. Diekeによってまとめられた希土類不純物の準位図から、やはり縮退した準位が多数存在することが知られている。

【0190】図19に示すように、この縮退した不純物準位を電場、磁場、圧力などの外場で解き、その中の2準位を光で結ばれない2準位として利用すると、この準位間に関して小さな不均一広がりを持ち、良好なEIT特性を示すΛ型またはV型3準位系を設定することが可能になる。

【0191】外場により縮退が解けて準位が分裂する現象としては、電場によって分裂が引き起こされるシュタルク効果、磁場によるゼーマン効果、圧力によるヤーン・テラー効果などがそれぞれ知られている。

【0192】シュタルク効果やゼーマン効果による準位分裂の大きさは、勿論用いる外場の大きさも依存するが、一般的には $\sim 1 \text{ cm}^{-1}$ 以下の微小なものであることが知られている。

【0193】したがって、分裂した2準位間の不均一広がりそれはそれよりもさらに小さい値を持つと考えられる。実際、これまでに報告されたシュタルク効果やゼーマン効果の文献から不均一広がり大きさを見積もると、シュタルク効果では 0.01 cm^{-1} 以下、ゼーマン効果では $0.0001 \sim 0.1 \text{ cm}^{-1}$ と、極めて小さな不均一広がり示す材料系が数多く存在することが分かった。

【0194】これらの点から、結晶中の縮退した不純物準位に外場を加えることによって、光で結ばれない2準位間の不均一広がりが極めて小さいΛ型またはV型3準位系を作り出すことが期待できる訳である。

【0195】以上、不純物原子や量子構造を対称に、 (ω_1, ω_2) 平面上でEITが発現し易い特定のエネルギー分布を持った材料系を選び出す方法、ならびにこの様な分布を持った材料系を作り出す方法について述べ

た。

【0196】この様な材料探索方法により、初めて固体でのEITが可能になるが、それだけに止まらず、例えば光変調素子やLWIレーザーなどEITを基本原理とする様々な光素子を実現することが可能になる。

【0197】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照しながら本発明の実施の形態（実施形態）を説明する。

【0198】（第1の実施形態）図7は、本発明の第1の実施形態に係わる光変調素子を模式的に示した図である。

【0199】この光変調素子は、大きく分けて、シグナル光の透過強度を変調する不純物を含む固体であるEIT層11と、このEIT層11に接して設けられ、ゲート光GをEIT層11に入力する半導体レーザー12と、入力シグナル光 S_{in} をEIT層11に入力する光ファイバ13と、EIT層11から出力された出力シグナル光 S_{out} の強度を測定するフォトダイオード14とから構成されている。ゲート光Gにより出力シグナル光 S_{out} の強度が制御される。

【0200】なお、半導体レーザー12から出されるゲート光Gは、EIT層11の全体を照射している。また、入力シグナル光 S_{in} にも半導体レーザーを用いている。

【0201】図8は、EIT層11中のエネルギー準位とゲート光G（光子エネルギー ω_1 ）、入力シグナル光 S_{in} （光子エネルギー ω_2 ）とを模式的に示したものである。図8（a）に示すΛ型励起の場合、EIT層11に用いる材料としては、準位2・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{23} が、準位1・準位2間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} 、準位1・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{13} に対して、 $\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ ならびに $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足する系を選択する。

【0202】また、ゲート光Gは準位1・準位2間を励起し、入力シグナル光 S_{in} は準位1・準位3間を励起する。さらに、準位2・準位3間のエネルギー差の中心値を ω_{23} としたとき、 $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{23}$ の関係が満たされるように ω_1, ω_2 をそれぞれ選択する。

【0203】このように構成された光変調素子によれば、EIT層11にゲート光Gと入力シグナル光 S_{in} をともに照射しているときには、EIT層11中の大部分の擬原子で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満足する。

【0204】したがって、ゲート光Gが無いときには、入力シグナル光 S_{in} はEIT層11で吸収されてほとんど透過しないが、ゲート光Gが有るときにはEIT層11での入力シグナル光 S_{in} の吸収が抑制されるため、大きな出力シグナル光 S_{out} が得られる。

【0205】なお、ゲート光Gは、もともと基底状態である準位3と結ばれず、準位1・準位2間を仮想励起しているため、EIT層11では吸収されずに透過する。

43

この効果により、EIT層11中では場所によらず、つまり、EIT層11中のほとんどすべての不純物で同時に入力シグナル光 S_{in} （以下、単にシグナル光という）を変調することが可能になる。

【0206】次に図8（b）に示すV型励起の場合、EIT層11に用いる材料としては、準位1・準位2間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} が、準位1・準位3間、準位2・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{13} 、 σ_{23} に対して、 $\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ 、 $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足する系を選択する。

【0207】また、V型励起では、先の Λ 型励起とは異なり、いずれの遷移も基底状態である準位3と結ばれている。このため、V型励起では、ゲート光Gと入力シグナル光 S_{in} は準位1・準位3間、準位2・準位3間どちらかを励起しても良い。

【0208】いま、ゲート光Gは準位2・準位3間を励起し、シグナル光は準位1・準位3間を励起すると仮定する。さらに、ゲート光Gとシグナル光の光子エネルギーをそれぞれ ω_1 、 ω_2 とし、準位1・準位2間のエネルギー差の中心値を ω_{12} としたとき、 $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{12}$ を満たすような ω_1 、 ω_2 を選択する。

【0209】このように構成された光変調素子によれば、EIT層11にゲート光Gとシグナル光をともに照射しているときには、EIT層11中の大部分の擬原子で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満足する。

【0210】したがって、ゲート光Gが無いときには、シグナル光はEIT層11で吸収されてほとんど透過しないが、それが有るときにはEIT層11でのシグナル光の吸収が抑制されるため、大きな出力シグナル光が得られる。

【0211】V型励起ではゲート光Gも基底状態である準位3と結ばれている。このため、シグナル光が無ければEIT層11で吸収され、EIT層中11で場所によってゲート光Gの強度が変化してしまう。しかし、シグナル光が有る場合にはゲート光Gは吸収されずに透過するため、V型励起でもEIT層11中では場所によらずシグナル光を変調することが可能になる。

【0212】さらに、図8（c）に示す Σ 型励起の場合、EIT層11に用いる材料としては、準位1・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{13} が、準位1・準位2間、準位2・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} 、 σ_{23} に対して、 $\sigma_{13} \leq \sigma_{12}$ 、 $\sigma_{13} \leq \sigma_{23}$ を満足する系を選択する。

【0213】ゲート光Gは準位1・準位2間を励起し、シグナル光は準位2・準位3間を励起する。さらに、ゲート光Gとシグナル光の光子エネルギーをそれぞれ ω_1 、 ω_2 とし、準位1・準位3間のエネルギー差の中心値を ω_{13} としたとき、 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_{13}$ を満たすような ω_1 、 ω_2 を選択する。

【0214】このように構成された光変調素子によれ

44

ば、EIT層11にゲート光Gとシグナル光をともに照射しているときには、EIT層11中の大部分の擬原子で $\Delta\omega_1 = -\Delta\omega_2$ を満足する。

【0215】したがって、ゲート光Gが無いときには、シグナル光はEIT層11で吸収されてほとんど透過しないが、それが有るときにはEIT層11でのシグナル光の吸収が抑制されるため、大きな出力シグナル光が得られる。

【0216】ゲート光Gはもともと基底状態である準位3と結ばれず準位1・準位2間を仮想励起しているため、EIT層11では吸収されずに透過する。この効果により、EIT層11中で場所によらずシグナル光を変調することが可能になる。

【0217】なお、実際の準位間エネルギーの標準偏差の見積もりに関して、まず3準位のうち光励起を行う2つの電子遷移については、この2つの遷移がともに許容遷移であることから光吸収や蛍光測定等で観測されるスペクトルピークの半値幅が準位間エネルギーの標準偏差と等しいとすることで見積もることができる。

【0218】また、光励起を行わない遷移については、本来禁制遷移であるため通常の光吸収や蛍光測定では観測することが難しいが、2光子吸収等を利用すればこの遷移についてもやはり実験的に準位間エネルギーの標準偏差を決定することが可能である。

【0219】（第2の実施形態）本実施形態は、図7に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、本実施形態では、EIT層11の材料として Cr^{3+} が不純物として1mol%分散している Al_2O_3 を用いている。また、光ファイバ13の光源としては色素レーザーを用い、フォトダイオード14としてはSiフォトダイオードを用いている。

【0220】3つのエネルギー準位としては、 Al_2O_3 中の Cr^{3+} 不純物のエネルギー準位を用い、具体的には、図9に示すように、一番上の準位1は、 t_{2g} 軌道に2個、 e_g 軌道に1個の電子が収容されてなる場合の $4T_1$ 準位、真ん中の準位2と、一番下の準位3は t_{2g} 軌道に3個の電子が収容された場合の $2E$ 準位および基底準位である $4A_2$ 準位をそれぞれ選択した。

【0221】なお、 $4T_1$ 、 $2E$ 、 $4A_2$ は各準位の対称性を表す既約表現である。結晶場理論より、 $4A_2 \rightarrow 4T_1$ 遷移と $2E \rightarrow 4T_1$ 遷移はともに許容遷移で、さらに結晶場の揺らぎを敏感に反映するため光吸収等のスペクトル線幅は不均一に広がり、準位間エネルギーのバラつきは大きいことが知られている。

【0222】これに対し、 $4A_2 \rightarrow 2E$ 遷移は禁制遷移で、しかも結晶場の揺らぎに鈍感なためスペクトル線幅は弱くシャープで、準位間エネルギーのバラつきも小さいことが知られている。

【0223】図10は、 Al_2O_3 中の Cr^{3+} の光吸収スペクトルを示す図である。図10において、2500

45

0 cm⁻¹付近にピークを持つブロードな吸収は準位3から準位1への4A₂ → 4T₁ 遷移に対応する。光吸収ピークの半値幅から見積もられた準位1・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差σ₁₃は2000~3000 cm⁻¹である。

【0224】また、15000 cm⁻¹付近にピークを持つ非常にシャープでしかも弱い吸収は、準位3から準位2への4A₂ → 2E 遷移に対応する。準位2・準位3間の標準偏差σ₂₃は0.1~1 cm⁻¹であり、準位1・準位3間のσ₁₃と比較して4桁程度小さい。

【0225】2E → 4T₁ 遷移に関しては、電子分布がゼロであるため、光吸収スペクトルから準位1・準位2間の標準偏差σ₁₂を求めることはできないが、田辺、菅野によるエネルギー準位の計算からは準位1・準位3間のσ₁₃と同程度の値を持つことが分かっている。

【0226】これらの点から、本実施形態の光変調素子では、上記3つの準位に関して、4A₂・4T₁ 準位間と2E・4T₁ 準位間をΛ型に光励起した。ゲート光Gの光子エネルギーω₁には準位1・準位2間の2E → 4T₁ 遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギーω₂には準位1・準位3間の4A₂ → 4T₁ 遷移に対応するものを選択した。

【0227】この時の光子エネルギーω₁、ω₂は、ω₂ - ω₁が準位2・準位3間の準位間エネルギーの中心値(14419 cm⁻¹)と一致するように調整した。なお、ゲート光Gの強度は0.1 W、またEIT層に入力するシグナル光の強度は1 mWとした。

【0228】以上の素子構造に基づいて、ゲート光Gの有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。

【0229】まず、ゲート光Gが無い場合には、シグナル光はEIT層11で吸収されるため、シグナル光の出力強度は入力に対して約9%にまで減少した。

【0230】次にゲート光Gを照射した場合には、入力に対して約75%の出力強度が得られ、ゲート光Gが無い場合と比較してシグナル光は透過しやすくなることが確かめられた。

【0231】図11に、ゲート光Gの光子エネルギーω₁を固定した状態で、シグナル光の光子エネルギーω₂を変えながら、準位3から準位1への吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、ゲート光Gの光子エネルギーω₁は9030 cm⁻¹である。

【0232】図11より、ω₂ - ω₁ (~14419 cm⁻¹) が、準位2・準位3間の準位間エネルギーの中心値と一致する光子エネルギー23449 cm⁻¹付近で、ω₂の光吸収は大きく減少することが分かる。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0233】ところで、このAl₂O₃中のCr³⁺不純物を利用して、固体におけるLWIを実現させようという提案がなされている(Y. Zhu et al., Phys. Rev. A 49, 4016 (1994))。

46

【0234】Y. Zhuらでは、3準位のうち、準位1には2E準位、準位2には4A₂準位中の4A₂(|±1/2>)準位、準位3には4A₂準位中の4A₂(|±3/2>)準位が用いられている。そして、上記3準位をΞ型に励起し、さらに準位3から準位1は電子をインコヒーレントに励起することにより、準位1・準位2間にレーザ発振が起こり、固体においてもLWIが実現できるとのべられている。

【0235】作用の項でも述べたように、準位1・準位2間、準位1・準位3間、準位2・準位3間それぞれの準位間エネルギーの標準偏差をσ₁₂、σ₁₃、σ₂₃とすると、Ξ型励起でEITを引き起こすには、準位1・準位3の標準偏差σ₁₃が、σ₁₃ ≤ σ₁₂、かつσ₁₃ ≤ σ₂₃の条件を満たすことが必要である。

【0236】Y. Zhuらの選んだ3準位のうち、準位1・準位3間の4A₂(|±3/2>) → 2E 遷移のσ₁₃は0.1~1 cm⁻¹である。一方、準位2・準位3間の4A₂(|±3/2>) → 4A₂(|±1/2>) 遷移に関しては、電子スピン共鳴の実験等からσ₂₃は0.1 cm⁻¹よりも小さくなることが知られている。したがって、Y. Zhuらの選んだ3準位ではΞ型励起の場合にσ₁₃ > σ₂₃となり、EITを引き起こすことは極めて難しい。このことから、固体でEITを実現するには、まず第1に各遷移間の準位間エネルギーの揺らぎの大きさ(標準偏差)を把握した上で、三つの準位を選択しなければならないことが分かる。

【0237】(比較例1) 準位2として2E準位の代わり4T₂準位を用い、これに伴いゲート光Gの光子エネルギーω₁を準位1・準位2間の4T₂ → 4T₁ 遷移に対応するものに变えた以外は、第2の実施形態と全く同様の構成の光変調素子を用いて、ゲート光Gの有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。なお、ω₂ - ω₁は18000 cm⁻¹に調整してある。

【0238】まず、ゲート光Gが無い場合については、第2の実施形態と同様にシグナル光の出力強度は入力に対して約9%にまで減少した。

【0239】次にゲート光Gを入れた場合、今度は第2の実施形態の場合とは異なり、入力に対してやはり9%程度の出力強度しか得られなかった。これより、本比較例ではゲート光Gの有無によらずシグナル光はほとんど透過しないことが分かった。図10に示した光吸収スペクトル18000 cm⁻¹付近に見られるブロードな吸収は、準位2・準位3間の4A₂ → 4T₂ 遷移に対応する。このスペクトルの広がりもやはり不均一広がり起因し、光吸収の半値幅から見積もられる準位2・準位3間のσ₂₃は2000~3000 cm⁻¹となる。

【0240】準位1・準位2間の4T₂ → 4T₁ 遷移は電子分布がゼロであるため、図10の吸収スペクトルには現れないが、田辺・菅野によるエネルギー準位の計算からは弱いしかもシャープなスペクトル線となることが

47

予測される。

【0241】これは、準位1・準位2間の σ_{12} が、準位1・準位3間、準位2・準位3間の σ_{13} 、 σ_{23} よりも桁違いに小さくなることを意味している。 Λ 型励起では、 $\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ 、 $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足するような系を選択する必要が有る。これより、本比較例では準位2・準位3間の σ_{23} が準位1・準位2間の σ_{12} に比べて非常に大きい。ため、ゲート光Gを照射してもシグナル光はほとんど変調されなかったことが分かる。

【0242】以上のことから、固体においてEITを発現させるには、各遷移の準位間エネルギー揺らぎに関する大小関係を十分に考慮した上で光励起を行う準位を選ぶ必要が有ることが理解される。

【0243】(第3の実施形態)本実施形態の光変調素子が第2の実施形態のそれと異なる点は、図7に示した光変調素子において、EIT層11の材料として、 Er^{3+} が不純物として1mol%分散している LiYF_4 を用いたことにある。

【0244】3つのエネルギー準位としては LiYF_4 中の Er^{3+} の不純物準位を用い、図12に示すように、一番上の準位1には $4S_{3/2}$ 準位のうち結晶場で分裂したE1準位、真ん中の準位2には $4I_{13/2}$ 準位のうち同じく結晶場で分裂したY1準位、一番下の準位3には基底準位である $4I_{15/2}$ 準位のうちやはり結晶場で分裂したZ2準位をそれぞれ選択した。

【0245】結晶場理論より、 $4S_{3/2}$ (E1)準位の対称性は Γ_5 である。また、 $4I_{13/2}$ (Y1)準位と $4I_{15/2}$ (Z2)準位の対称性はいずれも Γ_8 である。これにより、準位1・準位3間の $4I_{15/2}$ (Z2)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移は $\Gamma_8 \rightarrow \Gamma_5$ 、準位1・準位2間の $4I_{13/2}$ (Y1)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移も $\Gamma_8 \rightarrow \Gamma_5$ で、準位2・準位3間の $4I_{15/2}$ (Z2)→ $4I_{13/2}$ (Y1)遷移だけが $\Gamma_8 \rightarrow \Gamma_8$ となる。

【0246】下記の表1に、準位の対称性に関する光学遷移の選択則を示す。なお、表1中に示した光学遷移の許容ならびに禁制は、全て電気双極子遷移に関するものである。

【0247】

【表1】

Γ_1	Γ_5	Γ_6	Γ_7	Γ_8
Γ_5	×	○	○	○
Γ_6	○	×	○	○
Γ_7	○	○	×	○
Γ_8	○	○	○	×

×…禁制
○…許容

【0248】この表1より、準位1・準位3間の $4I_{15/2}$ (Z2)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移および準位1・準位2間の $4I_{13/2}$ (Y1)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移は許

48

容遷移であることが分かる。これに対し、準位2・準位3間の $4I_{15/2}$ (Z2)→ $4I_{13/2}$ (Y1)遷移は禁制遷移となる。

【0249】この結果から、 $4I_{13/2}$ (Y1)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移と $4I_{15/2}$ (Z2)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移では吸収強度が強く、しかも、結晶場の揺らぎを反映してスペクトル線幅は不均一に広がり、準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} 、 σ_{13} はともに大きいことが予測されるのに対して、 $4I_{15/2}$ (Z2)→ $4I_{13/2}$ (Y1)遷移は吸収強度が弱く、結晶場による準位間エネルギーのバラつきも小さいため、 σ_{23} は小さな値を持つ。

【0250】これより、本実施形態の光変調素子では、上記3つの準位について、 $4I_{15/2}$ (Z2)・ $4S_{3/2}$ (E1)準位間と $4I_{13/2}$ (Y1)・ $4S_{3/2}$ (E1)準位間を Λ 型に光励起した。

【0251】ゲート光Gの光子エネルギー ω_1 は準位1・準位2間の $4I_{13/2}$ (Y1)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 は準位1・準位3間の $4I_{15/2}$ (Z2)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移に対応するものを選択した。このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2・準位3間の準位間エネルギーの中心値(6517 cm⁻¹)と一致するように調整した。なお、ゲート光Gの強度は1W、またEIT層に入力するシグナル光の強度は1mWとした。

【0252】このように構成された光変調素子について、ゲート光Gの有無によるシグナル光の透過強度を調べた。

【0253】まず、ゲート光Gが無い場合には、シグナル光はEIT層11で吸収されるため、シグナル光の出力強度は入力に対して約11%にまで減少した。

【0254】次にゲート光Gを照射した場合には、入力に対して約81%の出力強度が得られ、ゲート光Gが無い場合と比較して、シグナル光は透過しやすくなることが確かめられた。

【0255】図13に、ゲート光Gの光子エネルギー ω_1 を固定した状態で、シグナル光の光子エネルギー ω_2 を変えながら、準位3から準位1への吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、ゲート光Gの光子エネルギー ω_1 は11898 cm⁻¹である。

【0256】図13より、 $\omega_2 - \omega_1$ (~6517 cm⁻¹)が準位2・準位3間の準位間エネルギーの中心値と一致する18415 cm⁻¹付近で、 ω_2 の光吸収は大きく減少することが分かった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0257】(比較例2)準位2として $4I_{13/2}$ (Y1)準位に代わり $4I_{13/2}$ (Y2)準位を用い、これに伴いゲート光Gの光子エネルギー ω_1 を準位1・準位2間の $4I_{13/2}$ (Y2)→ $4S_{3/2}$ (E1)遷移に対応するものに変えた以外は、第3の実施形態と全く同様の構

49

成の光変調素子を用いてゲート光Gの有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は6521 cm⁻¹に調整してある。

【0258】まず、ゲート光Gが無い場合については、第3の実施形態と同様シグナル光の出力強度は入力に対して約11%にまで減少した。

【0259】次にゲート光Gを入れた場合、今度は第3の実施形態とは異なり入力に対してやはり15%程度の出力強度しか得られなかった。これより、本比較例ではゲート光Gの有無によらずシグナル光はほとんど透過しないことがわかった。

【0260】 $4I_{13/2}$ (Y2) 準位の対称性は Γ_5 である。これより、準位1・準位2間の $4I_{13/2}$ (Y2) \rightarrow $4S_{3/2}$ (E1) 遷移は $\Gamma_5 \rightarrow \Gamma_5$ となり、準位2・準位3間の $4I_{15/2}$ (Z2) \rightarrow $4I_{13/2}$ (Y2) 遷移は $\Gamma_8 \rightarrow \Gamma_5$ となる。この結果と先の表1を用いると、 $4I_{13/2}$ (Y2) \rightarrow $4S_{3/2}$ (E1) 遷移は禁制遷移となり、吸収強度は小さくシャープな遷移であることが予測される。

【0261】これに対し、 $4I_{15/2}$ (Z2) \rightarrow $4I_{13/2}$ (Y2) 遷移は許容遷移で、吸収強度は大きくブロードな遷移となる。これは、準位1・準位2間の σ_{12} が準位2・準位3間の σ_{23} よりも小さくなることを意味している。

【0262】以上の結果より、本比較例では σ_{23} が σ_{12} に比べて大きいめに、ゲート光Gを照射してもシグナル光はほとんど変調されなかったことが理解される。

【0263】(第4の実施形態) 本実施形態の光変調素子が第2の実施形態のそれと異なる点は、図7に示した光変調素子において、EIT層11の材料としてPr³⁺が不純物として1mol%分散しているLiYF₄を用いたことにある。

【0264】3つのエネルギー準位としてはLiYF₄中のPr³⁺の不純物準位を用い、図14に示すように、一番上の準位1には $1D_2$ 準位のうち結晶場で分裂したC2準位、真ん中の準位2には $3H_5$ 準位のうち同じく結晶場で分裂したB4準位、一番下の準位3には基底準位である $3H_4$ 準位のうちやはり結晶場で分裂したA1準位をそれぞれ選択した。

【0265】各準位の対称性は、 $1D_2$ (C2) 準位が Γ_1 、 $3H_5$ (B4) 準位は Γ_2 、 $3H_4$ (A1) 準位も Γ_2 である。これにより、準位1・準位2間の $3H_5$ (B4) \rightarrow $1D_2$ (C2) 遷移は $\Gamma_2 \rightarrow \Gamma_1$ 、準位1・準位3間の $3H_4$ (A1) \rightarrow $1D_2$ (C2) 遷移も $\Gamma_2 \rightarrow \Gamma_1$ の遷移から構成され、準位2・準位3間の $3H_4$ (A1) \rightarrow $3H_5$ (B4) 遷移が $\Gamma_1 \rightarrow \Gamma_1$ の遷移から構成されている。

【0266】下記の表2は、準位の対称性に関する光学遷移の選択則を示す。なお、表2中に示した光学遷移の許容ならびに禁制は、全て電気双極子遷移に関するもの

50

である。

【0267】

【表2】

Γ_i	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4
Γ_1	×	○	○	○
Γ_2	○	×	○	○
Γ_3	○	○	×	○
Γ_4	○	○	○	×

×…禁制
○…許容

【0268】この表2より、準位1・準位2間の $3H_5$ (B4) \rightarrow $1D_2$ (C2) 遷移と準位1・準位3間の $3H_4$ (A1) \rightarrow $1D_2$ (C2) 遷移は許容遷移であり、準位2・準位3間の $3H_4$ (A1) \rightarrow $3H_5$ (B4) 遷移は禁制遷移になることが分かる。

【0269】これより、本光変調素子では、この3つの準位について、 $3H_4$ (A1)・ $1D_2$ (C2) 準位間と $3H_5$ (B4)・ $1D_2$ (C2) 準位間を Λ 型に光励起した。

【0270】ゲート光Gの光子エネルギー ω_1 は準位1・準位2間の $3H_5$ (B4) \rightarrow $1D_2$ (C2) 遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 は準位1・準位3間の $3H_4$ (A1) \rightarrow $1D_2$ (C2) 遷移に対応するものを選択した。

【0271】このときの ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2・準位3間の準位間エネルギーの中心値(2280 cm⁻¹)と一致するように調整した。なお、ゲート光Gの強度は1W、またEIT層11に入力するシグナル光の強度は1mWとした。

【0272】このように構成された光変調素子について、ゲート光Gの有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。

【0273】まず、ゲート光Gが無い場合には、シグナル光はEIT層11で吸収されるため、シグナル光の出力強度は入力に対して約7%にまで減少した。

【0274】次にゲート光Gを照射した場合には、入力に対して約69%の出力強度が得られ、ゲート光Gが無い場合と比較してシグナル光は透過しやすくなることが確かめられた。

【0275】(比較例3) 準位2として $3H_5$ (B4) 準位の代わり、対称性が Γ_1 である $3H_5$ (B1) 準位を用い、これに伴いゲート光Gの光子エネルギー ω_1 を準位1・準位2間の $3H_5$ (B1) \rightarrow $1D_2$ (C2) 遷移に対応するものに変えた以外は、第4の実施形態と全く同様の構成の光変調素子を用いてゲート光Gの有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は2253 cm⁻¹に調整してある。

【0276】まず、ゲート光Gが無い場合については、

51

第4の実施形態の場合と同様に、シグナル光の出力強度は入力に対して約7%にまで減少した。

【0277】次にゲート光Gを入れた場合、今度は第4の実施形態の場合とは異なり、入力に対して8%程度の出力強度しか得られなかった。これより、本比較例ではゲート光Gの有無によらずシグナル光はほとんど透過しないことが分かった。

【0278】(変形例) 本変形例は、図7に示した光変調素子において、第2～第4の実施形態とEIT層11の材料の種類が異なる点を除けば、あとは全て同一の構成を持つ。

【0279】下記の表3～表12に、本変形例の光変調*

52

*素子に用いたEIT層11の材料毎の、固体材料の種類、不純物の種類、3つの不純物準位それぞれの準位対称性の既約表現、3つの不純物準位それぞれのエネルギー位置、光励起の型、ゲート光Gを照射しないときのシグナル光の透過率、そしてゲート光Gを照射したときのシグナル光の透過率を示す。

【0280】表中に示される通り、ゲート光Gの有無で、シグナル光の透過率を著しく変調できることが理解される。

【0281】

【表3】

[表 3]

固体 不純物	エネルギー準位	シグナル光				シグナル光の透過率	
		ゲート光 の波長	シグナル光 の波長	励起型	シグナル光の透過率 (ゲート光無)	シグナル光の透過率 (ゲート光有)	
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位1 ; ¹ D ₂ 準位中の Γ_1 準位 準位2 ; ³ H ₆ 準位中の Γ_2 準位 準位3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位 16810 cm ⁻¹ 4314 cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~800.3 nm	~594.9 nm	Λ	15%	66%
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位1 ; ³ P ₀ 準位中の Γ_1 準位 準位2 ; ³ H ₆ 準位中の Γ_2 準位 準位3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位 20860 cm ⁻¹ 4314 cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~604.4 nm	~479.4 nm	Λ	4%	81%
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位1 ; ³ F ₂ 準位中の Γ_1 準位 準位2 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 準位3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 5159 cm ⁻¹ ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~1938.4nm	~1938.4 nm	Λ	5%	92%
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位1 ; ³ F ₃ 準位中の $\Gamma_{3,4}$ 準位 準位2 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 準位3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 6481 cm ⁻¹ ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~1543.0nm	~1543.0 nm	Λ	5%	92%

* * 【表4】

【表4】

固体	不純物	エネルギー単位	ゲート光		シグナル光 の波長	励起型		シグナル光の透過率	
			の波長			(ゲート光無)		(ゲート光有)	
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位 1 ; ³ F ₄ 準位中のΓ ₁ 準位 準位 2 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₂ 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₂ 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~1445.1nm	Λ	~1445.1 nm	Λ	7 %	9 0 %	
			~1031.0nm	Λ	~1031.0 nm	Λ	3 2 %	9 5 %	
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位 1 ; ¹ D ₂ 準位中のΓ ₁ 準位 準位 2 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₂ 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₂ 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~594.9 nm	Λ	~594.9 nm	Λ	1 5 %	9 6 %	
			~479.4 nm	Λ	~479.4 nm	Λ	4 %	8 8 %	
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位 1 ; ³ P ₀ 準位中のΓ ₁ 準位 準位 2 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₂ 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₂ 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~479.4 nm	Λ	~479.4 nm	Λ	4 %	8 8 %	
			~479.4 nm	Λ	~479.4 nm	Λ	4 %	8 8 %	

55

56

【表 5】

固体 不純物		エネルギー単位	ゲート光		シグナル光	励起型	シグナル光の透過率		ゲート光の透過率
			の波長		の波長		(ゲート光無)		(ゲート光有)
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位 1 ; ¹ G ₄ 準位中の Γ_1 準位	~1445.1nm	~1031.0nm	V	V	3 2 %	5 4 %	
		準位 2 ; ³ F ₄ 準位中の Γ_1 準位							
		準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位							
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位 1 ; ³ P ₀ 準位中の Γ_1 準位	~1445.1nm	~479.4 nm	V	V	4 %	7 7 %	
		準位 2 ; ³ F ₄ 準位中の Γ_1 準位							
		準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位							
YLF	Pr ³⁺ , 1 mol%	準位 1 ; ³ P ₀ 準位中の Γ_1 準位	~1031.0nm	~479.4 nm	V	V	4 %	4 8 %	
		準位 2 ; ¹ G ₄ 準位中の Γ_1 準位							
		準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_2 準位							
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%	準位 1 ; ¹ D ₂ 準位中の Γ_1 準位	~1006.8nm	~608.8 nm	Λ	Λ	2 1 %	3 9 %	
		準位 2 ; ³ F ₃ 準位中の Γ_3 準位							
		準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位							
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%	準位 1 ; ³ P ₀ 準位中の Γ_1 準位	~710.9 nm	~487.0 nm	Λ	Λ	6 %	8 1 %	
		準位 2 ; ³ F ₃ 準位中の Γ_3 準位							
		準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位							
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%	準位 1 ; ³ P ₁ 準位中の Γ_2 準位	~686.0 nm	~475.2 nm	Λ	Λ	6 %	8 0 %	
		準位 2 ; ³ F ₃ 準位中の Γ_3 準位							
		準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位							

【0 2 8 4】

【表 6】

57

【表 6】

固体	不純物	エネルギー単位	ゲート光 の波長	シグナル光 の波長	励起型	シグナル光の透過率 (ゲート光無)	シグナル光の透過率 (ゲート光有)
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%	準位 1 ; ³ P ₂ 準位中の Γ_2 準位 22103 cm ⁻¹ 準位 2 ; ³ F ₃ 準位中の Γ_3 準位 6467 cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位 0 cm ⁻¹	~639.6 nm	~452.4 nm	Λ	1 1 %	5 9 %
		準位 1 ; ³ F ₂ 準位中の Γ_2 準位 5430 cm ⁻¹ 準位 2 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~1841.6nm	~1841.6 nm			
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%	準位 1 ; ³ F ₃ 準位中の Γ_1 準位 6482 cm ⁻¹ 準位 2 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~1542.7nm	~1542.7 nm	Λ	7 %	9 3 %
		準位 1 ; ³ F ₄ 準位中の Γ_1 準位 7085 cm ⁻¹ 準位 2 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中の Γ_3 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~1411.4nm	~1411.4 nm			

58

【表 7】

【0285】

59

60

【表 7】

固体		不純物	エネルギー単位	ゲート光 の波長	シグナル光 の波長	励起型	照射光の透過率 (ゲート光無)	照射光の透過率 (ゲート光有)
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%		準位 1 : ¹ G ₄ 準位中のΓ ₁ 準位 8282 cm ⁻¹ 準位 2 : ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の l=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 : ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の l=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~1077.4nm	~1077.4 nm	Λ	3.6%	4.3%
			準位 1 : ¹ D ₂ 準位中のΓ ₁ 準位 16810 cm ⁻¹ 準位 2 : ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の l=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 : ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の l=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~609.8 nm	~609.8 nm	Λ	2.1%	6.8%
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%		準位 1 : ³ P ₀ 準位中のΓ ₁ 準位 20850 cm ⁻¹ 準位 2 : ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の l=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 : ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の l=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~487.0 nm	~487.0 nm	Λ	6%	9.5%
			準位 1 : ³ P ₁ 準位中のΓ ₂ 準位 21045 cm ⁻¹ 準位 2 : ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の l=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 : ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の l=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~475.2 nm	~475.2 nm	Λ	6%	9.0%

【0286】

【表 8】

61

【表 8】

固体 不純物		エネルギー単位	ゲート光 の波長	シグナル光 の波長	励起型	シグナル光の透過率 (ゲート光無)	シグナル光の透過率 (ゲート光有)
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%	準位 1 ; ³ P ₂ 準位中のΓ ₂ 準位 22103 cm ⁻¹ 準位 2 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の I=±5/2 準位か±3/2 準位 ~10 ⁻³ cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位中の I=±3/2 準位か±1/2 準位 0 cm ⁻¹	~452.4 nm	~452.4 nm	Λ	11%	51%
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%	準位 1 ; ¹ D ₂ 準位中のΓ ₁ 準位 20534 cm ⁻¹ 準位 2 ; ³ F ₃ 準位中のΓ ₁ 準位 16400 cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位 0 cm ⁻¹	~609.8 nm	~487.0 nm	V	21%	30%
YAG	Pr ³⁺ , 0.5mol%	準位 1 ; ³ P ₀ 準位中のΓ ₂ 準位 22103 cm ⁻¹ 準位 2 ; ³ F ₃ 準位中のΓ ₂ 準位 21045 cm ⁻¹ 準位 3 ; ³ H ₄ 準位中のΓ ₃ 準位 0 cm ⁻¹	~475.2 nm	~452.4 nm	V	6%	83%
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 ; ⁵ D ₁ 準位中のΓ ₂ 準位 18947 cm ⁻¹ 準位 2 ; ⁷ F ₄ 準位中のΓ ₁ 準位 2392 cm ⁻¹ 準位 3 ; ⁷ F ₀ 準位中のΓ ₁ 準位 0 cm ⁻¹	~604.1 nm	~527.8 nm	Λ	40%	50%
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 ; ⁵ D ₁ 準位中のΓ ₄ 準位 18984 cm ⁻¹ 準位 2 ; ⁷ F ₄ 準位中のΓ ₁ 準位 2392 cm ⁻¹ 準位 3 ; ⁷ F ₀ 準位中のΓ ₁ 準位 0 cm ⁻¹	~602.7 nm	~528.8 nm	Λ	44%	48%

62

【表 9】

【0287】

83

64

【表 9】

固体		不純物		エネルギー単位		ゲート光		シグナル光		励起型		波長光の透過率	
						の波長		の波長				(ゲート光無)	
												(ゲート光有)	
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ⁵ D ₂	準位中のΓ ₃	準位 21358 cm ⁻¹	~527.3 nm	~468.2 nm	Λ			31%		59%	
		準位 2 : ⁷ F ₄	準位中のΓ ₁	準位 2392 cm ⁻¹									
		準位 3 : ⁷ F ₀	準位中のΓ ₁	準位 0 cm ⁻¹									
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ⁵ D ₂	準位中のΓ ₄	準位 21450 cm ⁻¹	~524.7 nm	~468.2 nm	Λ			36%		54%	
		準位 2 : ⁷ F ₄	準位中のΓ ₁	準位 2392 cm ⁻¹									
		準位 3 : ⁷ F ₀	準位中のΓ ₁	準位 0 cm ⁻¹									
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ⁵ D ₂	準位中のΓ ₂	準位 21473 cm ⁻¹	~524.1 nm	~465.7 nm	Λ			41%		49%	
		準位 2 : ⁷ F ₄	準位中のΓ ₁	準位 2392 cm ⁻¹									
		準位 3 : ⁷ F ₀	準位中のΓ ₁	準位 0 cm ⁻¹									
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ⁵ D ₁	準位中のΓ ₂	準位 18947 cm ⁻¹	~715.0 nm	~527.8 nm	Λ			40%		47%	
		準位 2 : ⁷ F ₆	準位中のΓ ₁	準位 4961 cm ⁻¹									
		準位 3 : ⁷ F ₀	準位中のΓ ₁	準位 0 cm ⁻¹									
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ⁵ D ₁	準位中のΓ ₄	準位 18984 cm ⁻¹	~713.1 nm	~526.8 nm	Λ			44%		47%	
		準位 2 : ⁷ F ₆	準位中のΓ ₁	準位 4961 cm ⁻¹									
		準位 3 : ⁷ F ₀	準位中のΓ ₁	準位 0 cm ⁻¹									
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ⁵ D ₂	準位中のΓ ₃	準位 21358 cm ⁻¹	~609.9 nm	~468.2 nm	Λ			31%		55%	
		準位 2 : ⁷ F ₆	準位中のΓ ₁	準位 4961 cm ⁻¹									
		準位 3 : ⁷ F ₀	準位中のΓ ₁	準位 0 cm ⁻¹									

【0288】

【表10】

【表10】

固体 不純物		エネルギー単位	ゲート光 の波長	シグナル光 の波長	励起型	ゲート光の透過率 (ゲート光無)		ゲート光の透過率 (ゲート光有)
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 5D ₂ 準位中のΓ ₄ 準位	~606.5 nm	~486.2 nm	Λ	3 6 %	5 3 %	
		準位 2 : 7F ₆ 準位中のΓ ₁ 準位						
		準位 3 : 7F ₀ 準位中のΓ ₁ 準位						
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 5D ₂ 準位中のΓ ₂ 準位	~605.6 nm	~485.7 nm	Λ	4 1 %	4 7 %	
		準位 2 : 7F ₆ 準位中のΓ ₁ 準位						
		準位 3 : 7F ₀ 準位中のΓ ₁ 準位						
YAG	Eu ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 5L ₆ 準位中のΓ ₃ 準位	~527.8 nm	~406.0 nm	V	5 1 %	6 4 %	
		準位 2 : 7D ₁ 準位中のΓ ₃ 準位						
		準位 3 : 7F ₀ 準位中のΓ ₁ 準位						
YLF	Ho ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 5F ₄ 準位中のΓ ₁ 準位	~758.5 nm	~537.7 nm	V	7 %	3 0 %	
		準位 2 : 5I ₄ 準位中のΓ ₁ 準位						
		準位 3 : 5I ₈ 準位中のΓ _{3,4} 準位						
YAG	Ho ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 5G ₂ , 3F ₄ (4), 3K ₆ (2) 準位の全て,	566.7 ~ 604.0 nm	323.3 ~ 335.1 nm	Λ	9 ~ 3 3 %	4 1 ~ 5 5 %	
		準位 2 : 5I ₄ 準位中のΓ ₂ 準位						
		準位 3 : 5I ₈ 準位中のΓ ₂ 準位						

【表11】

【0289】

67

68

【表11】

固体 不純物		エネルギー単位	ゲート光 の波長		シグナル光 の波長		励起型	シグナル光の透過率 (ゲート光無)		ゲート光の透過率 (ゲート光有)	
YAG	Ho ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 5F ₃ 準位中のΓ ₄ 準位 準位 2 : 5I ₆ 準位中のΓ ₄ 準位 準位 3 : 5I ₈ 準位中のΓ ₂ 準位	20593 cm ⁻¹ 11301 cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~884.9 nm	~485.6 nm	V		12%	79%		
YAG	Ho ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 3D ₃ (1) 準位中のΓ ₂ 準位 準位 2 : 5I ₅ 準位中のΓ ₃ 準位 準位 3 : 5I ₈ 準位中のΓ ₂ 準位	33014 cm ⁻¹ 11301 cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~569.7 nm	~639.4 nm	E		3%	88%		
YAG	Ho ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 3D ₃ (1) 準位中のΓ ₂ 準位 準位 2 : 5S ₂ 準位中のΓ ₁ 準位 準位 3 : 5I ₆ 準位中のΓ ₂ 準位	33014 cm ⁻¹ 18450 cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~686.6 nm	~542.0 nm	E		3%	91%		
YLF	Tm ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 1D ₂ 準位中のΓ _{3,4} 準位 準位 2 : 3H ₄ 準位中のΓ ₂ 準位 準位 3 : 3H ₆ 準位中のΓ ₂ 準位	28019 cm ⁻¹ 12621 cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~649.4 nm	~356.9 nm	A		38%	42%		
YLF	Tm ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : 1D ₂ 準位中のΓ ₂ 準位 準位 2 : 3F ₃ 準位中のΓ _{3,4} 準位 準位 3 : 3H ₆ 準位中のΓ ₂ 準位	27932 cm ⁻¹ 14531 cm ⁻¹ 0 cm ⁻¹	~746.2 nm	~688.2 nm	E		7%	94%		

【0290】

【表12】

【表12】

固体	不純物	エネルギー単位	ゲート光		励起型	シグナル光		シグナル光の透過率	
			の波長	の波長		の波長	の波長	(ゲート光無)	(ゲート光有)
YAG	Tm ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ¹ G ₄ 準位中の Γ_1 準位	~793.2 nm	~480.7 nm	V	~480.7 nm		26%	45%
		準位 2 : ³ H ₄ 準位中の Γ_1 準位							
		準位 3 : ³ H ₆ 準位中の Γ_2 準位							
YAG	Tm ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ¹ D ₂ 準位中の Γ_1 準位	~793.2 nm	~358.8 nm	V	~358.8 nm		37%	76%
		準位 2 : ³ H ₄ 準位中の Γ_1 準位							
		準位 3 : ³ H ₆ 準位中の Γ_2 準位							
YAG	Tm ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ¹ D ₂ 準位中の Γ_1 準位	~480.7 nm	~358.8 nm	V	~358.8 nm		37%	55%
		準位 2 : ¹ G ₄ 準位中の Γ_1 準位							
		準位 3 : ³ H ₆ 準位中の Γ_2 準位							
YAG	Tb ³⁺ , 1 mol%	準位 1 : ⁵ D ₂ 準位中の Γ_4 準位	~645.3 nm	~487.4 nm	Δ	~487.4 nm		44%	60%
		準位 2 : ⁷ F ₄ 準位中の Γ_1 準位							
		準位 3 : ⁷ F ₆ 準位中の Γ_1 準位							

【0291】（第6の実施形態）図24は、本発明の第6の実施形態に係わる光変調素子を模式的に示した図である。

【0292】この光変調素子は、大きく分けて、2本の光21、22の透過強度を变調するEIT層23と、このEIT層23を挟む2枚の電極24、25と、これら電極24、25の間に電圧を印加してEIT層23に与えられる外場としての電場の大きさを制御するための電源26と、EIT層23に光21、22をそれぞれ入力する光ファイバー27、28と、EIT層23から出力された2本の光の透過強度をそれぞれ測定するフォトダイオード29、30とから構成されている。

【0293】なお、光ファイバー27、28から出された2本の光21、22のうち、 Δ 型励起では準位1・2間を励起する光21、V型励起では準位2・3間を励起する光21がEIT層23の全体を照射する。また、EIT層23に照射する2本の光21、22はともにレーザー光である。

【0294】図25は、EIT層23中のエネルギー準位とそこに入射する2本の光21、22とを模式的に示したものである。

【0295】図25(a)は Δ 型励起の場合を示しており、EIT層23に用いる材料としては外場を印加しないときに準位2と準位3が縮退するような準位を選択す

る。この様な単位を選ぶことにより、外場（電場）印加時の準位2・3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{23} は、準位1・2間、準位1・3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} 、 σ_{13} に対して $\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ 、ならびに $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足する。

【0296】2本の光21, 22の光子エネルギーについては、準位1・2間を励起する光21の光子エネルギーを ω_1 、準位1・3間を励起する光22の光子エネルギーを ω_2 とし、準位2・3間のエネルギー差の中心値を ω_{23} としたとき、 $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{23}$ を満たすような ω_1 、 ω_2 をそれぞれ選択する。

【0297】以上の様に構成することで、EIT層23に2本の光21, 22が照射しているときには、EIT層23中の大部分の擬原子で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ となる。外場がゼロの場合には2本の光21, 22はともにEIT層23で吸収されてほとんど透過しないが、 $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{23}$ を満たす特定の大きさの外場を印加した場合には、EIT層23での光吸収が抑制されるため、光21, 22ともに大きな光出力が得られるようになる。

【0298】これより、外場の大きさを操作することで光の透過強度を変調させることが可能になる。

【0299】次に、図25(b)に示すV型励起の場合、EIT層23に用いる材料としては、外場を印加しないときに、準位1および準位2が縮退するような単位を選択する。

【0300】この様な単位を選ぶことにより、外場印加時の準位1・2間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} は、準位1・3間、準位2・3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{13} 、 σ_{23} に対して $\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ 、ならびに $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足する。

【0301】光21, 22の光子エネルギーについては、準位2・3間を励起する光21の光子エネルギーを ω_1 、準位1・3間を励起する光22の光子エネルギーを ω_2 とし、準位1, 2間のエネルギー差の中心値を ω_{12} としたとき、 $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{12}$ を満たすような ω_1 、 ω_2 をそれぞれ選択する。

【0302】以上の様に構成することで、V型励起の場合についても Λ 型励起の場合と同様、EIT層23に2本の光21, 22を照射しているときには、EIT層23中の大部分の擬原子で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ となる。

【0303】外場がゼロの場合には2本の光21, 22はともにEIT層23で吸収されてほとんど透過しないが、 $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{12}$ を満たす特定の大きさの外場を印加した場合にはEIT層23での光吸収が抑制されるため、光21, 22ともに大きな光出力が得られるようになる。これより、外場の大きさを操作することで光の透過強度を変調させることが可能になる。

【0304】なお、実際の系では3準位の中で光で結ばれない2準位に関して、まず準位間エネルギーを求め、この値を基に2本の光21, 22の光子エネルギー

ω_1 、 ω_2 を決定しなければならない。

【0305】この光で結ばれない準位間の遷移は本来禁制であるため通常の光吸収や蛍光測定では観測が難しいが、2光子吸収等を利用すれば正確な準位間エネルギーや不均一広がり大きさなども実験的に決定することが可能である。

【0306】（第6の実施形態）本実施形態の光変調素子は、図24に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、本実施形態では、EIT層23の材料としてGd³⁺が不純物として1mol%分散しているLiYF₄を用いている。また、光21, 22としては光子エネルギー ω_1 、 ω_2 がともに $\sim 32100\text{ cm}^{-1}$ の色素レーザー光を用い、フォトダイオード29, 30としてはSiフォトダイオードを用いている。また、電源26としては直流電源装置を用いている。

【0307】エネルギー準位としては、LiYF₄に電場を印加した際のGd³⁺不純物のエネルギー準位を用い、具体的には、図26に示すように、一番上の準位1には⁶P_{7/2}準位を用い、そして、真ん中の準位2と一番下の準位3には⁸S準位を用いた。

【0308】電圧がゼロの場合には⁸S準位は8重に縮退しているが、電圧印加時にはシュタルク効果によって内磁気量子数M_Jの絶対値が異なる4つの準位に分裂する。

【0309】準位2と準位3にはこの4準位の中からエネルギーの小さい⁸S(a)準位と⁸S(b)準位の2つの準位を選択した。

【0310】これより、本光変調素子ではこの3つの準位に関して、⁶P_{7/2}・⁸S(a)準位間と⁶P_{7/2}・⁸S(b)準位間を Λ 型に光励起した。

【0311】光21の光子エネルギー ω_1 には準位1、2間の⁸S(a)→⁶P_{7/2}遷移に対応するものを選び、光22の光子エネルギー ω_2 には準位1、3間の⁸S(b)→⁶P_{7/2}遷移に対応するものを選択した。

【0312】この時の光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2、3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致するように調整した。なお、EIT層23に入力する光21, 22の強度はともに1Wとした。

【0313】図27は、一定の波長を持つマイクロ波を照射した状態で、印加電圧を変化させながら分裂した⁸S(a)・⁸S(b)準位間のマイクロ波吸収を測定し、電圧に依存して ω_{23} の値がどの様に变化するかを調べた結果を示す。

【0314】なお、横軸は電界強度Eの2乗で整理し直してある。また、図27には、⁸S(a)・⁸S(b)準位間のマイクロ波吸収に関する典型的な吸収スペクトルも示してある。

【0315】本実施形態の光素子では、 $\omega_{23} = 0.1\text{ cm}^{-1}$ を選択している。これより、LiYF₄には $\sim 10^5\text{ V/cm}$ の電界強度がかかるように印加電圧の値を設

73

定した。

【0316】スペクトル線幅は $8S(a) \cdot 8S(b)$ 準位間の不均一広がりに対応し、その値はおよそ 0.001 cm^{-1} であった。このことから、電圧印加によって分裂した準位を利用することにより、光で結ばれない準位間に小さな不均一広がりを持つ Λ 型3準位系を設定できることが分かる。

【0317】このように構成された光素子について、光21の有無による光22の透過強度を調べた。まず、光21が無い場合には、光22はEIT層23で吸収されるため、光22の出力強度は入力に対して約5%にまで減少した。

【0318】次に、光21を入れた場合には、入力に対して約72%の出力強度が得られ、光21が無い場合と比較して光22は透過しやすくなることが確かめられた。

【0319】図28に、光21の光子エネルギー ω_1 は固定した状態で、光22の光子エネルギー ω_2 を変えながら準位3から準位1への $8S(b) \rightarrow 6S$ 遷移の吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、光21の光子エネルギー ω_1 はおよそ 32100 cm^{-1} である。

【0320】図28より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2、3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致する光子エネルギー $\sim 0.1 \text{ cm}^{-1}$ で、光22の吸収は大きく減少することが分かる。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0321】(比較例4) LiYF_4 に印加する電圧の値をゼロに変えた以外は、第6の実施形態と全く同様の構成の光変調素子を用いて光21の有無による光22の透過強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は第6の実施形態と同様、 0.1 cm^{-1} に調整してある。

【0322】まず、光21が無い場合については、第6の実施形態の場合と同様、光22の出力強度は入力に対して約5%にまで減少した。一方、光21を入れた場合、今度は第6の実施形態の場合とは異なり、入力に対してやはり5%程度の出力強度しか得られなかった。以上の結果から、本比較例では、光21の有無によらず、光22はほとんど透過しないことが分かった。

【0323】図26に示したエネルギー準位図からも分かるように、電圧がゼロの場合には大多数の Gd^{3+} 不純物で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ が成立していない。このため、2本の光を入力してもEIT層で吸収されてしまうため、出力強度が増加しなかったことが分かる。

【0324】以上のことから、固体においてEITを発現させるには、3準位の中でも特に光で結ばれない準位間の不均一広がりを十分考慮した上で光励起を行う準位を選択する必要があることが分かる。

【0325】また、電圧印加により準位間エネルギー分布の制御を行うと、光で結ばれない準位間に関して極めて小さな不均一広がりを設定することができ、したがっ

74

て、良好なEIT特性を得られることが理解される。

【0326】(第7の実施形態) 本実施形態の光変調素子は、図24に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、EIT層23として Pr^{3+} が不純物として $1 \text{ mol} \%$ 分散している LaCl_3 を用いている。また、光21、22として光子エネルギー ω_1 、 ω_2 がともに $\sim 16630 \text{ cm}^{-1}$ の色素レーザー光を用い、フォトダイオード29、30としてはSiフォトダイオードを用いている。また、電源26としては直流電源装置を用いている。

【0327】エネルギー準位としては、 LaCl_3 に電場を印加した際の Pr^{3+} 不純物のエネルギー準位を用い、具体的には、図29に示すように、一番上の準位1には $1D_2$ 準位を用い、真ん中の準位2と一番下の準位3には $3H_4$ 準位のうち既に結晶場で分裂した6つの準位の中で最もエネルギーの低い $3H_4 (\mu=2)$ 準位を選択した。

【0328】電圧がゼロの場合には $3H_4 (\mu=2)$ 準位は2重に縮退しているが、この準位は非クラマース2重項であるため電圧印加時には分裂する。準位2と準位3には、この $3H_4 (\mu=2)$ 準位から分裂した $3H_4 (a)$ 準位と $3H_4 (b)$ 準位の2つの準位を用いた。

【0329】これより、本光変調素子ではこの3つの準位に関して、 $1D_2 \cdot 3H_4 (a)$ 準位間と $1D_2 \cdot 3H_4 (b)$ 準位間を Λ 型に光励起した。

【0330】光21の光子エネルギー ω_1 には準位1、2間の $3H_4 (a) \rightarrow 1D_2$ 遷移に対応するものを選び、光22の光子エネルギー ω_2 には準位1、3間の $3H_4 (b) \rightarrow 1D_2$ 遷移に対応するものを選択した。

【0331】この時の光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2、3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致するように調整した。なお、EIT層23に入力する光21、22の強度はともに 1 W とした。

【0332】図30は、一定の波長を持つマイクロ波を照射した状態で、印加電圧を変化させながら分裂した $3H_4 (a) \cdot 3H_4 (b)$ 準位間のマイクロ波吸収を測定し、電圧に依存して ω_{23} の値がどの様に変化するかを調べた結果を示す。

【0333】なお、横軸は電界強度 E で整理し直してある。また、図30には、 $3H_4 (a) \cdot 3H_4 (b)$ 準位間のマイクロ波吸収に関する典型的な吸収スペクトルも示してある。

【0334】本実施形態の素子では、 $\omega_{23} = 0.07 \text{ cm}^{-1}$ を選択している。これより、 LaF_3 には $\sim 5 \times 10^4 \text{ V/cm}$ の電界強度がかかるように印加電圧の値を設定した。

【0335】スペクトル線幅は $3H_4 (a) \cdot 3H_4 (b)$ 準位間の不均一広がりに対応し、その値はおよそ 0.0008 cm^{-1} であった。このことから、電圧印加によって分裂した準位を利用することにより、光で結

75

ばれない準位間に小さな不均一広がりを持つA型3準位系を設定できることが分かる。

【0336】このように構成された光素子について、光21の有無による光22の透過強度を調べた。まず、光21が無い場合には、光22はEIT層23で吸収されるため、光22の出力強度は入力に対して約12%にまで減少した。

【0337】次に、光21を入れた場合は入力に対して約69%の出力強度が得られ、光21が無い場合と比較して光22は透過しやすくなることが確かめられた。

【0338】図31に、光21の光子エネルギー ω_1 は固定した状態で、光22の光子エネルギー ω_2 を変えながら準位3から準位1への $3H_4(b) \rightarrow 1D_2$ 遷移の吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、光21の光子エネルギー ω_1 はおおよそ 16630 cm^{-1} である。

【0339】図31より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2、3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致する光子エネルギー $\sim 0.07\text{ cm}^{-1}$ で、光22の吸収は大きく減少することが分かった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0340】(比較例5) LaCl_3 に印加する電圧の値をゼロに変えた以外は、第7の実施形態と全く同様の構成の光変調素子を用いて光21の有無による光22の透過強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は第7の実施形態と同様、 0.07 cm^{-1} に調整してある。まず、光21が無い場合については、第7の実施形態の場合と同様、光22の出力強度は入力に対して約12%にまで減少した。次に、光21を入れた場合、今度は第7の実施形態とは異なり、入力に対してやはり12%程度の出力強度しか得られなかった。以上の結果から、本比較例では光21の有無によらず、光22はほとんど透過しないことが分かった。

【0341】図29に示したエネルギー準位図からも分かるように、電圧がゼロの場合には大多数の Pr^{3+} 不純物で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ が成立していない。このため、2本の光を入力してもEIT層で吸収されてしまうため、出力強度が増加しなかったことが分かる。

【0342】以上のことから、電圧印加により準位間エネルギー分布の制御を行うと、光で結ばれない準位間に関して極めて小さな不均一広がりを設定することができ、したがって良好なEIT特性を得られることが理解される。

【0343】(第8の実施形態) 本実施形態の光変調素子は、図24に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、本実施形態では、EIT層23の材料として Eu^{3+} が不純物として1mol%分散している Y_2O_3 を用いている。また、光21、22としては光子エネルギー ω_1 、 ω_2 がともに $\sim 19025\text{ cm}^{-1}$ の色素レーザー光を用い、フォトダイオード29、30としてはSiフォトダイオードを用いている。また、電源2

76

6としては直流電源装置を用いている。

【0344】エネルギー準位としては、 Y_2O_3 に電場を印加した際の Eu^{3+} 不純物のエネルギー準位を用い、具体的には、図32に示すように、一番上の準位1と真ん中の準位2には $5D_1$ 準位を用い、一番下の準位3には $7F_0$ 準位を選択した。

【0345】電圧がゼロの場合には $5D_1$ 準位は3重に縮退しているが、電圧印加時には2つの準位に分裂する。準位1と準位2には、この $5D_1$ 準位から分裂した $5D_1(a)$ 準位と $5D_1(b)$ 準位の2つの準位を用いた。なお、 $7F_0$ 準位は1重項である。

【0346】これより、本光変調素子ではこの3つの準位に関して、 $5D_1(a) \cdot 7F_0$ 準位間と $5D_1(b) \cdot 7F_0$ 準位間をV型に光励起した。

【0347】光21の光子エネルギー ω_1 には準位2、3間の $7F_0 \rightarrow 5D_1(b)$ 遷移に対応するものを選び、光22の光子エネルギー ω_2 には準位1、3間の $7F_0 \rightarrow 5D_1(a)$ 遷移に対応するものを選択した。

【0348】この時の光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1、2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致するように調整した。なお、EIT層23に入力する光21、22の強度はともに1Wとした。

【0349】図33は、 $7F_0$ 準位から $5D_1$ 準位にレーザー光で光励起を行い、さらに一定の波長を持つマイクロ波を照射した状態で、印加電圧を変化させながら分裂した $5D_1(a) \cdot 5D_1(b)$ 準位間のマイクロ波吸収を測定し、電圧に依存して ω_{12} の値がどの様に変化するかを調べた結果を示す。

【0350】なお、横軸は電界強度Eで整理し直してある。また、図33には、 $5D_1(a) \cdot 5D_1(b)$ 準位間のマイクロ波吸収に関する典型的な吸収スペクトルを示してある。

【0351】本実施形態の光素子では、 $\omega_{12} = 0.12\text{ cm}^{-1}$ を選択している。これより、 Y_2O_3 には $\sim 7 \times 10^4\text{ V/cm}$ の電界強度がかかるように印加電圧の値を設定した。

【0352】スペクトル線幅は $5D_1(a) \cdot 5D_1(b)$ 準位間の不均一広がりに対応し、その値はおおよそ 0.003 cm^{-1} であった。このことから、電圧印加によって分裂した準位を利用することにより、光で結ばれない準位間に小さな不均一広がりを持つV型3準位系を設定できることが分かる。

【0353】このように構成された光素子について、光21の有無による光22の透過強度を調べた。まず、光21が無い場合は光22はEIT層23で吸収されるため、光22の出力強度は入力に対して約15%にまで減少した。

【0354】次に、光21を入れた場合は入力に対して約81%の出力強度が得られ、光21が無い場合と比較して光22は透過しやすくなることが確かめられた。

【0355】図34に、光21の光子エネルギー ω_1 は固定した状態で、光22の光子エネルギー ω_2 を変えながら準位3から準位1への $7F_0 \rightarrow 5D_1$ (a) 遷移の吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、光21の光子エネルギー ω_1 はおよそ 19025 cm^{-1} である。

【0356】図34より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1、2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致する光子エネルギー $\sim 0.12 \text{ cm}^{-1}$ で、光2の吸収は大きく減少することが分かった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0357】(比較例6) Y_2O_3 に印加する電圧の値をゼロに変えた以外は、本実施形態と全く同様の構成の光変調素子を用いて光21の有無による光22の透過強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は本実施形態と同様、 0.12 cm^{-1} に調整してある。

【0358】まず、光21が無い場合については、第7の実施形態と同様、光22の出力強度は入力に対して約15%にまで減少した。一方、光21を入れた場合、今度は第7の実施形態とは異なり入力に対してやはり15%程度の出力強度しか得られなかった。以上の結果から、本比較例では光21の有無によらず、光22はほとんど透過しないことが分かった。

【0359】図32に示したエネルギー準位図からも分かるように、電圧がゼロの場合には大多数の Eu^{3+} 不純物で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ が成立していない。このため、2本の光を入力してもEIT層で吸収されてしまうため、出力強度が増加しなかったことが分かる。

【0360】以上のことから、電圧印加により準位間エネルギー分布の制御を行うと、光で結ばれない準位間に関して極めて小さな不均一広がりを設定することができ、したがって良好なEIT特性を得られることが理解される。

【0361】(第9の実施形態) 本実施形態の光変調素子は、図24に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、本実施形態では、EIT層23の材料として Sm^{2+} が不純物として1mol%分散している $BaClF$ を用いている。また、光21、22としては光子エネルギー ω_1 、 ω_2 がともに $\sim 15870 \text{ cm}^{-1}$ の色素レーザー光を用い、フォトダイオード29、30としてはSiフォトダイオードを用いている。また、電源6としては直流電源装置を用いている。

【0362】エネルギー準位としては、 $BaClF$ に電場を印加した際の Sm^{2+} 不純物のエネルギー準位を用い、具体的には、図35に示すように、一番上の準位1と真ん中の準位2には $5D_1$ 準位を用い、一番下の準位3には $7F_0$ 準位を選択した。電圧がゼロの場合には $5D_1$ 準位は3重に縮退しているが、電圧印加時には2つの準位に分裂する。準位1と準位2には、この $5D_1$ 準位から分裂した $5D_1$ (a) 準位と $5D_1$ (b) 準位の2つの準位を用いた。なお、 $7F_0$ 準位は1重項であ

る。

【0363】これより、本光変調素子ではこの3つの準位に関して、 $5D_1$ (a)・ $7F_0$ 準位間と $5D_1$ (b)・ $7F_0$ 準位間をV型に光励起した。

【0364】光21の光子エネルギー ω_1 には準位2、3間の $7F_0 \rightarrow 5D_1$ (b) 遷移に対応するものを選び、光22の光子エネルギー ω_2 には準位1、3間の $7F_0 \rightarrow 5D_1$ (a) 遷移に対応するものを選択した。

【0365】この時の光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1、2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致するように調整した。なお、EIT層3に入力する光21、22の強度はともに1Wとした。

【0366】図36は、 $7F_0$ 準位から $5D_1$ 準位にレーザー光で光励起を行い、さらに一定の波長を持つマイクロ波を照射した状態で、印加電圧を変化させながら分裂した $5D_1$ (a)・ $5D_1$ (b) 準位間のマイクロ波吸収を測定し、電圧に依存して ω_{12} の値がどの様に変化するかを調べた結果を示す。

【0367】なお、横軸は電界強度Eの2乗で整理し直してある。また、図37には、 $5D_1$ (a)・ $5D_1$ (b) 準位間のマイクロ波吸収に関する典型的な吸収スペクトルも示してある。

【0368】本実施形態の素子では、 ω_{12} としては 0.06 cm^{-1} を選択している。これより、 $BaClF$ には $\sim 3 \times 10^4 \text{ V/cm}$ の電界強度がかかるように印加電圧の値を設定した。

【0369】スペクトル線幅は $5D_1$ (a)・ $5D_1$ (b) 準位間の不均一広がりに対応し、その値はおよそ 0.009 cm^{-1} であった。このことから、電圧印加によって分裂した準位を利用することにより、光で結ばれない準位間に小さな不均一広がりを持つV型3準位系を設定できることが分かる。

【0370】このように構成された光素子について、光21の有無による光22の透過強度を調べた。まず、光21が無い場合は光22はEIT層23で吸収されるため、光22の出力強度は入力に対して約10%にまで減少した。

【0371】次に、光21を入れた場合は入力に対して約77%の出力強度が得られ、光21が無い場合と比較して光22は透過しやすくなることが確かめられた。

【0372】図37に、光21の光子エネルギー ω_1 は固定した状態で、光22の光子エネルギー ω_2 を変えながら準位3から準位1への $7F_0 \rightarrow 5D_1$ (a) 遷移の吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、光21の光子エネルギー ω_1 はおよそ 15870 cm^{-1} である。

【0373】図37より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1、2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致する光子エネルギー $\sim 0.06 \text{ cm}^{-1}$ で、光22の吸収は大きく減少することが分かった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

79

【0374】（比較例7）BaCIFに印加する電圧の値をゼロに変えた以外は、第9の実施形態と全く同様の構成の光変調素子を用いて光21の有無による光22の透過強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は第8の実施形態と同様、 0.06 cm^{-1} に調整してある。まず、光21が無い場合については、第9の実施形態の場合と同様、光22の出力強度は入力に対して約10%にまで減少した。一方、光21を入れた場合、今度は第9の実施形態とは異なり、入力に対してやはり10%程度の出力強度しか得られなかった。以上の結果から、本比較例では光21の有無によらず、光22はほとんど透過しないことが分かった。

【0375】図35に示したエネルギー準位図からも分かるように、電圧がゼロの場合には大多数の Sm^{2+} 不純物で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ が成立していない。このため、2本の光を入力してもEIT層で吸収されてしまうため、出力強度が増加しなかったことが分かる。

【0376】以上のことから、電圧印加により準位間エネルギー分布の制御を行うと、光で結ばれない準位間に関して極めて小さな不均一広がりを設定することができ、したがって良好なEIT特性を得られることが理解される。

【0377】（第10の実施形態）図38は、本発明の第10の実施形態に係わる光変調素子を模式的に示した図である。

【0378】この光変調素子は、大きく分けて、2本の光21、22の透過強度を変調するEIT層23と、このEIT層23を挟む2枚の電磁石11、12と、これら電磁石11、12の間に電圧を印加してEIT層23に与えられる外場としての磁場の大きさを制御するための図示しない電源と、EIT層23に光21、22をそれぞれ入力する光ファイバー27、28と、EIT層23から出力された2本の光の透過強度をそれぞれ測定するフォトダイオード29、30とから構成されている。

【0379】なお、光ファイバー27、28からそれぞれ出された光21、22のうち、 Λ 型励起では準位1、2間を励起する光21、V型励起では準位2、3間を励起する光21がEIT層23の全体を照射する。また、EIT層23に照射する2本の光21、22はともにレーザー光である。

【0380】本実施形態では、EIT層23の材料として Er^{3+} が不純物として1mol%分散している $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ を用いている。また、光21、22としては光子エネルギー ω_1 、 ω_2 がともに $\sim 18030 \text{ cm}^{-1}$ の色素レーザー光を用い、フォトダイオード29、30としてはSiフォトダイオードを用いている。

【0381】エネルギー準位としては、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ に磁場を印加した際の Er^{3+} 不純物のエネルギー準位を用い、具体的には、図39に示すように、一番上の準位1には $4\text{S}_{3/2}$ 準位を用い、真ん中の準位2と一番下の

80

準位3には $4\text{I}_{15/2}$ 準位の中でも結晶場により分裂した $4\text{I}_{15/2}(\text{Z}1)$ 準位を選択した。

【0382】磁場がゼロの場合には $4\text{I}_{15/2}(\text{Z}1)$ 準位は2重に縮退しているが、磁場印加時にはこの縮退は解けて分裂する。準位2と準位3には、この $4\text{I}_{15/2}(\text{Z}1)$ 準位から分裂した $4\text{I}_{15/2}(\text{a})$ 準位と $4\text{I}_{15/2}(\text{b})$ 準位の2つの準位を用いた。なお、 $4\text{S}_{3/2}$ 準位には4つのエネルギー準位が存在するが、この中でも最もエネルギーの低い準位を用いた。

【0383】これより、本光変調素子ではこの3つの準位に関して、 $4\text{S}_{3/2} \cdot 4\text{I}_{15/2}(\text{a})$ 準位間と $4\text{S}_{3/2} \cdot 4\text{I}_{15/2}(\text{b})$ 準位間を Λ 型に光励起した。

【0384】光21の光子エネルギー ω_1 には準位1、2間の $4\text{I}_{15/2}(\text{a}) \rightarrow 4\text{S}_{3/2}$ 遷移に対応するものを選び、光22の光子エネルギー ω_2 には準位1、3間の $4\text{I}_{15/2}(\text{b}) \rightarrow 4\text{S}_{3/2}$ 遷移に対応するものを選択した。

【0385】この時の光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2、3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致するように調整した。なお、EIT層23に入力する光21、22の強度はともに1Wとした。

【0386】図40は、一定の波長を持つマイクロ波を照射した状態で、外部磁場の大きさを変化させながら分裂した $4\text{I}_{15/2}(\text{a}) \cdot 4\text{I}_{15/2}(\text{b})$ 準位間のマイクロ波吸収を測定し、磁場電圧に依存して ω_{23} の値がどの様に変化するかを調べた結果を示す。

【0387】なお、図40には、 $4\text{I}_{15/2}(\text{a}) \cdot 4\text{I}_{15/2}(\text{b})$ 準位間のマイクロ波吸収に関する典型的な吸収スペクトルも示してある。

【0388】本実施形態の素子では、 $\omega_{23} = 0.3 \text{ cm}^{-1}$ を選択している。これより、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ に $\sim 30 \text{ mT}$ の磁場がかかるように電磁石11、12を操作した。スペクトル線幅は $4\text{I}_{15/2}(\text{a}) \cdot 4\text{I}_{15/2}(\text{b})$ 準位間の不均一広がりに対応し、その値はおよそ 0.03 cm^{-1} であった。このことから、磁場印加によって分裂した準位を利用することにより、光で結ばれない準位間に小さな不均一広がりを持つ Λ 型3準位系を設定できることが分かる。

【0389】このように構成された光素子について、光21の有無による光22の透過強度を調べた。まず、光21が無い場合には、光22はEIT層23で吸収されるため、光22の出力強度は入力に対して約6%にまで減少した。

【0390】次に、光21を入れた場合には、入力に対して約84%の出力強度が得られ、光21が無い場合と比較して光22は透過しやすくなることが確かめられた。

【0391】図41に、光21の光子エネルギー ω_1 は固定した状態で、光22の光子エネルギー ω_2 を変えながら準位3から準位1への $4\text{I}_{15/2}(\text{b}) \rightarrow 4\text{S}_{3/2}$ 遷

81

移の吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、光 2 1 の光子エネルギー ω_1 はおよそ 18030 cm^{-1} である。

【0392】図 4 1 より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位 2、3 間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致する光子エネルギー $\sim 0.3 \text{ cm}^{-1}$ で、光 2 2 の吸収は大きく減少することが分かった。このことから、本現象が EIT に由来することが理解される。

【0393】（比較例 8） $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ に印加する外部磁場の値をゼロに変えた以外は、第 10 の実施形態と全く同様の構成の光変調素子を用いて光 2 1 の有無による光 2 2 の透過強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は第 6 の実施形態と同様、 0.3 cm^{-1} に調整してある。

【0394】まず、光 2 1 が無い場合については、第 10 の実施形態と同様、光 2 2 の出力強度は入力に対して約 6 % にまで減少した。一方、光 2 1 を入れた場合、今度は第 10 の実施形態とは異なり、入力に対してやはり 6 % 程度の出力強度しか得られなかった。以上の結果から、本比較例では、光 2 1 の有無によらず、光 2 2 はほとんど透過しないことが分かった。

【0395】図 3 9 に示したエネルギー準位図からも分かるように、磁場の大きさがゼロの場合には大多数の E_{r3} 不純物で $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ が成立していない。このため、2 本の光を入力しても EIT 層で吸収されてしまうため、出力強度が増加しなかったことがわかる。

【0396】以上のことから、外部磁場を印加することによって準位間エネルギー分布の制御を行うと、光で結ばれない準位間に関して極めて小さな不均一広がりを設定することができ、したがって良好な EIT 特性を得られることが理解される。

【0397】（第 11 の実施形態）本実施形態の光変調素子は、図 3 8 に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、EIT 層 23 として、InAs 層、GaSb 層の層厚ともに 10 nm で、超格子全体の厚みが $2 \mu\text{m}$ である InAs/GaSb 超格子を用いている。図 4 2 にここで用いた InAs/GaSb 超格子 30 の断面図を示す。また、光 2 1、2 2 としては光子エネルギー ω_1 、 ω_2 がともに 100 cm^{-1} 程度の水蒸気レーザ光を用い、さらに EIT 層 23 から出力された 2 本の光の強度を、フォトダイオードに変えて 2 個のカーボンボロメータでそれぞれ測定する構成とした。

【0398】なお、InAs/GaSb 超格子 30 への磁場印加は電磁石 31、32 を操作することにより行なった。また、磁場は超格子に対して垂直方向に印加した。また、超格子 30 は GaSb 基板 33 上に形成した。

【0399】エネルギー準位としては、InAs/GaSb 超格子 30 に磁場を印加した際の量子準位を用い、具体的には、図 4 3 に示すように、一番上の準位 1 と真ん中の準位 2 には InAs 層中の E_1 準位を用い、一番

82

下の準位 3 には GaSb 層中の H_1 準位を選択した。磁場がゼロの場合には E_1 準位、 H_1 準位はそれぞれ縮退しているが、磁場を超格子に対して垂直方向に印加した場合は各準位は完全に離散的なランダウ準位に分裂する。準位 1 と準位 2 には、この E_1 準位から分裂した E_1 ($N=16$) 準位と E_1 ($N=15$) 準位の二つの準位を用い、準位 3 には H_1 準位から分裂した H_1 ($N=16$) 準位を用いた。

【0400】これより、本光変調素子ではこの三つの準位に関して、 E_1 ($N=16$)・ H_1 ($N=16$) 準位間と E_1 ($N=15$)・ H_1 ($N=15$) 準位間を V 型に光励起した。

【0401】光 2 1 の光子エネルギー ω_1 には準位 2・3 間の H_1 ($N=16$) \rightarrow E_1 ($N=15$) 遷移に対応するものを選び、光 2 2 の光子エネルギー ω_2 には準位 1・3 間の H_1 ($N=16$) \rightarrow E_1 ($N=16$) 遷移に対応するものを選択した。

【0402】この時の光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致するように調整した。なお、EIT 層 23 に入力する光 1 1、1 2 の強度はともに 1 W とした。ここで、 E_1 準位 (H_1 準位) から分裂したランダウ準位 ($N=0, 1, 2, 3, \dots, 15, 16, \dots$) では、隣り合う準位間の準位間エネルギーは N によらず一定で、また、その大きさは磁場の強さに比例して増加する。

【0403】図 4 4 は、遠赤外光を用いた電子に対するサイクロトロン共鳴の実験から E_1 に関するランダウ準位間の準位間エネルギーの磁場依存性を求め、磁場電圧に依存して ω_{12} の値がどのように変化するかを調べた結果を示す。なお、図 4 4 には、 $\sim 1 \text{ T}$ の磁場を印加した際の E_1 ($N=11$)・ E_1 ($N=12$) 準位間のサイクロトロン共鳴に関するスペクトルも示してある。

【0404】本実施形態の光変調素子では、 $\omega_{12}=10 \text{ cm}^{-1}$ を選択している。これより、InAs/GaSb 超格子 30 に $\sim 1 \text{ T}$ の磁場がかかるように電磁石 31、32 を操作した。

【0405】スペクトル線幅は E_1 ($N=11$)・ E_1 ($N=12$) 準位間の不均一広がりに対応し、その値はおよそ 0.5 cm^{-1} であった。先にも述べたように、ランダウ準位間の準位間エネルギーは N によらず一定であるため、 $\sim 1 \text{ T}$ の磁場印加時における E_1 ($N=15$)・ E_1 ($N=16$) 準位間の不均一広がりもまた 0.5 cm^{-1} 程度である。

【0406】このことから、磁場印加によって分裂した準位を利用することにより、光で結ばれない準位間に小さな不均一広がりを持つ V 型 3 準位系を設定できることが分かる。

【0407】このように構成された光変調素子について、光 2 1 の有無による光 2 2 の透過強度を調べた。まず、光 2 1 が無い場合は光 2 2 は EIT 層 23 で吸収さ

83

れるため、光22の出力強度は入力に対して約36%にまで減少した。

【0408】次に、光21を入れた場合は入力に対して約91%の出力強度が得られ、光21が無い場合と比較して光22は透過しやすくなることが確かめられた。

【0409】図45に、光21の光子エネルギー ω_1 は固定した状態で、光22の光子エネルギー ω_2 を変えながら準位3から準位1への H_1 ($N=16$) $\rightarrow E_1$ ($N=16$) 遷移の吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、光21の光子エネルギー ω_1 はおよそ100 cm⁻¹ である。

【0410】図45より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1、2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致する光子エネルギー ~ 10 cm⁻¹で、光22の吸収は大きく減少することが分かった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0411】InAs/GaSb超格子30に印加する外部磁場の値をゼロに変えた以外は、第9の実施形態と全く同様の構成の光変調素子を用いて光21の有無による光22の強度透過を調べた。なお $\omega_2 - \omega_1$ は第11の実施形態と同様、10 cm⁻¹に調整してある。

【0412】まず、光21が無い場合については、第11の実施形態と同様、光22の出力強度は入力に対して約36%にまで減少した。一方、光21を入れた場合、今度は第11の実施形態とは異なり入力に対してやはり36%程度の出力強度しか得られなかった。以上の結果から、本比較例では光21の有無によらず、光22はほとんど透過しないことが分かった。

【0413】図43に示したエネルギー準位図からも分かるように、磁場の大きさがゼロの場合にはランダウ準位が形成されず、 $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ が成立していない。このため、2本の光を入力しても出力強度が増加しなかったことが分かる。

【0414】以上のことより、外部磁場を印加すること *

$$\sigma_{12} = \{ (1/N) \sum [\omega_{12}(i) - \langle \omega_{12} \rangle]^2 \}^{1/2}$$

$$\sigma_{13} = \{ (1/N) \sum [\omega_{13}(i) - \langle \omega_{13} \rangle]^2 \}^{1/2}$$

$$\sigma_{23} = \{ (1/N) \sum [\omega_{23}(i) - \langle \omega_{23} \rangle]^2 \}^{1/2}$$

ただし、NはEIT層52中の量子構造の総数、 $\omega_{12}(i)$ はi番目 ($i=1 \sim N$) の量子構造の量子井戸の第1の準位と第2の準位との間の準位間エネルギー、 $\omega_{13}(i)$ はi番目 ($i=1 \sim N$) の量子構造の量子井戸の第1の準位と第3の準位との間の準位間エネルギー、 $\omega_{23}(i)$ はi番目 ($i=1 \sim N$) の量子構造の量子井戸の第2の準位と第3の準位との間の準位間エネルギー、 $\langle \omega_{12} \rangle$ はN個全ての量子構造の量子井戸についての $\omega_{12}(i)$ の平均値、 $\langle \omega_{13} \rangle$ はN個全ての量子構造の量子井戸についての $\omega_{13}(i)$ の平均値、 $\langle \omega_{23} \rangle$ はN個全ての量子構造の量子井戸についての $\omega_{23}(i)$ の平均値である。

【0422】さらに、ゲート光53が準位1・準位2間

84

*によって準位間エネルギー分布の制御を行うと、光で結ばれない準位間に関して極めて小さな不均一広がりを設定することができ、したがって良好なEIT特性を得られることが理解される。

【0415】(第12の実施形態) 図46は、本発明の第12の実施形態に係わる光変調素子を模式的に示す図である。

【0416】この光変調素子は、量子井戸、量子細線、量子箱等の量子構造を有し、シグナル光51の透過強度を変調するEIT層52と、このEIT層52に接して設けられ、EIT層52にゲート光53を入力する半導体レーザー (不図示) と、EIT層52にシグナル光51を導いて入力する光ファイバー54と、EIT層52から出力されたシグナル光51の強度を測定するフォトダイオード55と、EIT層52から出力されたゲート光53の強度を測定するフォトダイオード56とから構成されている。

【0417】なお、EIT層52には支持体50が設けられている。また、上記半導体レーザーから出されるゲート光53は光ファイバー57によりEIT層52に導かれ、EIT層52の全体を照射するようになっている。また、シグナル光51はレーザー光である。

【0418】図47は、EIT層52中のエネルギー準位とゲート光53、シグナル光51との関係を模式的に示したものである。

【0419】図47(a)に示すA型励起の場合、EIT層52に用いる材料としては、準位2・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{23} が、準位1・準位2間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} 、準位1・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{13} に対して、 $\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ および $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足する系を選択する。

【0420】ここで、 σ_{12} 、 σ_{13} 、 σ_{23} は次のように定義されている。

【0421】

を励起し、シグナル光51が準位1・準位3間を励起し、かつゲート光53、シグナル光51の光子エネルギーをそれぞれ ω_1 、 ω_2 とし、準位2・準位3間のエネルギー差の中心値を ω_{23} としたときに、ゲート光53、シグナル光51が $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{23}$ を満足するようにする。

【0423】このような条件を満足させることにより、EIT層52にゲート光53およびシグナル光51が照射されているときには、EIT層52中の大部分の擬原子は $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満足する。

【0424】したがって、ゲート光53が無いときにはシグナル光51はEIT層52で吸収されてほとんど透過しないが、ゲート光53が有るときにはEIT層52

でのシグナル光51の吸収が抑制されるため、大きな光出力が得られる。

【0425】一方、図47(b)に示すV型励起の場合、EIT層52に用いる材料としては、準位1・準位2間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} が、準位1・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{13} 、準位2・3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{23} に対して、 $\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ および $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足する系を選択する。

【0426】さらに、ゲート光53が準位2・準位3間を励起し、シグナル光51が準位1・準位3間を励起し、かつゲート光53、シグナル光51の光子エネルギーをそれぞれ ω_1 、 ω_2 とし、準位1・準位2間のエネルギー差の中心値を ω_{12} としたときに、ゲート光53、シグナル光51が $\omega_2 - \omega_1 = \omega_{12}$ を満足するようにする。

【0427】このような条件を満足させることにより、EIT層52にゲート光53およびシグナル光51が照射されているときには、EIT層52中の大部分の擬原子が $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ を満足する。

【0428】したがって、ゲート光53が無いときにはシグナル光51はEIT層52で吸収されてほとんど透過しないが、ゲート光53が有るときにはEIT層52でのシグナル光51の吸収が抑制されるため、大きな光出力が得られる。

【0429】なお、実際の系では3準位の中で光で結ばれない2準位に関して、まず、準位間エネルギーを求め、この値を基にゲート光53、シグナル光51のそれぞれの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 を決定しなければならない。

【0430】この光で結ばれない準位間の遷移は本来禁制であるため通常の光吸収や蛍光測定では観測が難しいが、2光子吸収等を利用すれば正確な準位間エネルギーや不均一広がり大きさなども実験的に決定することが可能である。

【0431】(第13の実施形態) 本実施形態の光変調素子は、図46に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、本実施形態の光変調素子は、EIT層52としてGaAs/AlGaAs超格子を用い、ゲート光53の光源およびシグナル光51の光源として色素レーザーを用い、フォトダイオード55、56としてSiフォトダイオードを用いた構成となっている。

【0432】図48に、本実施形態で用いたGaAs/AlGaAs超格子の断面構造を示す。

【0433】GaAs/AlGaAs超格子はGaAs基板上に形成されており、量子井戸層であるGaAs層の厚みは30nm、量子障壁層であるAlGaAs層の厚みは30nmである。また、GaAs/AlGaAs超格子の全体の厚さは6 μ mである。

【0434】本実施形態では、このように量子障壁層を厚くすることで、量子井戸間の電子的な結合を抑え、エ

ネルギー準位のボケにつながるサブバンド形成を抑制している。また、GaAs基板による光吸収を抑制するために、一部基板をエッチングして、超格子にのみ光が照射するようにしてある。なお、不純物のドーピングは行っていない。

【0435】3つのエネルギー準位としては、GaAs層中の準位を用い、図49に示すように、一番上の準位1には伝導帯中の E_{e2} 準位、真ん中の準位2と一番下の準位3には価電子帯中の E_{hh1} 準位と E_{lh1} 準位をそれぞれ選択した。

【0436】これより、本実施形態では、上記3つの準位に関して、 $E_{e2} \cdot E_{hh1}$ 準位間と $E_{e2} \cdot E_{lh1}$ 準位間を Λ 型に光励起した。ゲート光の光子エネルギー ω_1 には準位1・2間の $E_{hh1} \rightarrow E_{e2}$ 遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 には準位1・3間の $E_{lh1} \rightarrow E_{e2}$ 遷移に対応するものを選択した。

【0437】このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2・準位3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致するように調整した。なお、ゲート光の強度は1W、また、EIT層に入力するシグナル光の強度は1mWとした。

【0438】このように構成された光変調素子について、ゲート光の有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。

【0439】その結果、ゲート光が無い場合は、シグナル光はEIT層で吸収され、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約3%となり、低い値にまで減少した。

【0440】一方、ゲート光が有る場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約45%となり、ゲート光が無い場合と比較して、シグナル光は透過しやすくなることを確認した。

【0441】図50に、ゲート光の光子エネルギー ω_1 (周波数)を固定した状態で、シグナル光の光子エネルギー ω_2 (周波数)を変えながら、準位3から準位1への吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、光子エネルギー ω_1 は14085.4989cm⁻¹である。

【0442】図50より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2・準位3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致する光子エネルギー付近で、シグナル光の光吸収は大きく減少することがわかる。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0443】(第14の実施形態) 本実施形態の光変調素子は、図46に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、本実施形態の光変調素子は、EIT層52としてInGaAs/AlGaAs超格子を用い、ゲート光53の光源およびシグナル光51の光源として色素レーザーを用い、フォトダイオード55、56としてSiフォトダイオードを用いた構成となっている。

【0444】図51に、本実施形態で用いたInGaAs

／AlGaIn超格子の断面構造を示す。

【0445】InGaIn／AlGaIn超格子はサファイア基板上に形成されており、量子井戸層であるInGaIn層の厚みは30nm、量子障壁層であるAlGaIn層の厚みは30nmである。また、InGaIn／AlGaIn超格子の全体の厚さは6μmである。また、基板による光吸収を抑制するために、一部基板をエッチングして、超格子にのみ光が照射するようにしてある。

【0446】本実施形態では、このように量子障壁層を厚くすることで量子井戸間の電子的な結合を抑え、エネルギー準位のボケにつながるサブバンド形成を抑制している。なお、不純物のドーピングは行っていない。

【0447】3つのエネルギー準位としてはInGaIn層中の準位を用い、図52に示すように、一番上の準位1と真ん中の準位2には伝導帯中の E_{e2} 準位と E_{e1} 準位、一番下の準位3には価電子帯中の E_{hh3} 準位をそれぞれ選択した。

【0448】これより、本実施形態では、上記3つの準位に関して、 $E_{e1} \cdot E_{hh3}$ 準位間と $E_{e2} \cdot E_{hh3}$ 準位間をV型に光励起した。ゲート光の光子エネルギー ω_1 には準位2・3間の $E_{hh3} \rightarrow E_{e1}$ 遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 には準位1・3間の $E_{hh3} \rightarrow E_{e2}$ 遷移に対応するものを選択した。

【0449】このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1・準位2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致するように調整した。なお、ゲート光の強度は1W、また、EIT層に入力するシグナル光の強度は1mWとした。

【0450】このように構成された光変調素子について、ゲート光の有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。

【0451】その結果、ゲート光が無い場合はシグナル光はEIT層で吸収されるため、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約3%となり、低い値にまで減少した。

【0452】一方、ゲート光が有る場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約45%となり、ゲート光が無い場合と比較して、シグナル光は透過しやすくなることを確認した。

【0453】図53に、ゲート光の光子エネルギー ω_1 （周波数）を固定した状態で、シグナル光の光子エネルギー ω_2 （周波数）を変えながら、準位3から準位1への吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、ゲート光の周波数 ω_1 は28122.5487cm⁻¹である。

【0454】図53より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1・準位2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致する光子エネルギー付近で、シグナル光の光吸収は大きく減少することがわかった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0455】（第15の実施形態）本実施形態の光変調

素子は、図46に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、本実施形態の光変調素子は、EIT層52としてZnSe／MgZnSeS超格子を用い、ゲート光53の光源およびシグナル光51の光源として色素レーザーを用い、フォトダイオード55、56としてSiフォトダイオードを用いた構成となっている。

【0456】図54に、本実施形態で用いたZnSe／MgZnSeS超格子の断面構造を示す。

【0457】ZnSe／MgZnSeS超格子はZnSe基板上に形成されており、量子井戸層であるZnSe層の厚みは30nm、量子障壁層であるMgZnSeS層の厚みは30nmである。また、ZnSe／MgZnSeS超格子の全体の厚さは6μmである。

【0458】本実施形態では、このように量子障壁層を厚くすることで、量子井戸間の電子的な結合を抑え、エネルギー準位のボケにつながるサブバンド形成を抑制している。なお、不純物のドーピングは行っていない。

【0459】3つのエネルギー準位としてはZnSe層中の準位を用い、図55に示すように、一番上の準位1と真ん中の準位2には伝導帯中の E_{e2} 準位と E_{e1} 準位、一番下の準位3には価電子帯中の E_{hh3} 準位をそれぞれ選択した。

【0460】これより、本実施形態では、上記3つの準位に関して、 $E_{e1} \cdot E_{hh3}$ 準位間と $E_{e2} \cdot E_{hh3}$ 準位間をV型に光励起した。ゲート光の光子エネルギー ω_1 には準位2・3間の $E_{hh3} \rightarrow E_{e1}$ 遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 には準位1・3間の $E_{hh3} \rightarrow E_{e2}$ 遷移に対応するものを選択した。

【0461】このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1・準位2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致するように調整した。なお、ゲート光の強度は1W、また、EIT層に入力するシグナル光の強度は1mWとした。

【0462】このように構成された光変調素子について、ゲート光の有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。

【0463】その結果、ゲート光が無い場合はシグナル光はEIT層で吸収されるため、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約3%となり、低い値にまで減少した。

【0464】一方、ゲート光が有る場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約45%となり、ゲート光が無い場合と比較して、シグナル光は透過しやすくなることが確かめられた。

【0465】図56に、ゲート光の光子エネルギー ω_1 （周波数）を固定した状態で、シグナル光の光子エネルギー ω_2 （周波数）を変えながら準位3から準位1への吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、ゲート光の周波数 ω_1 は25069.8247cm⁻¹である。

【0466】図56より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1・準位2

10

20

30

40

50

間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致する光子エネルギー付近で、 ω_2 の光吸収は大きく減少することがわかった。このことから、本現象が EIT に由来することが理解される。

【0467】(第16の実施形態) 本実施形態の光変調素子は、図46に示した光変調素子において、EIT層52としてGaAs/AlGaAs超格子を用い、ゲート光53の光源およびシグナル光51の光源として赤外半導体レーザーを用い、そして、EIT層52の出力光を測定するために、フォトダイオード55、56の代わり

に、MCT検出器を用いた構成となっている。

【0468】図57に、本実施形態で用いたGaAs/AlGaAs超格子の断面構造を示す。

【0469】GaAs/AlGaAs超格子はGaAs基板上に形成されており、量子井戸層であるGaAs層の厚みは30nm、量子障壁層であるAlGaAs層の厚みは30nmである。また、GaAs/AlGaAs超格子の全体の厚さは6 μ mである。

【0470】本実施形態では、このように量子障壁層を厚くすることで、量子井戸間の電子的な結合を抑え、エネルギー準位のボケにつながるサブバンド形成を抑制している。なお、ドナー不純物であるSiをAlGaAs層にドーピングすることでGaAs層の伝導帯に電子を注入した。

【0471】3つのエネルギー準位としてはGaAs層の伝導帯中の準位を用い、図58に示すように、一番上の準位1には E_{e3} 準位、真ん中の準位2には E_{e2} 準位、一番下の準位3には E_{e1} 準位を選択した。

【0472】これより、本実施形態では、上記3つの準位に関して、上記3つの準位に関して、 $E_{e3} \cdot E_{e2}$ 準位間と $E_{e3} \cdot E_{e1}$ 準位間を Λ 型に光励起した。ゲート光の光子エネルギー ω_1 には準位1・2間の $E_{e2} \rightarrow E_{e3}$ 遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 には準位1・3間の $E_{e1} \rightarrow E_{e3}$ 遷移に対応するものを選択した。

【0473】このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2・3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致するように調整した。なお、ゲート光の強度は1W、また、EIT層に入力するシグナル光の強度は1mWとした。

【0474】このように構成された光変調素子について、ゲート光の有無によるシグナル光の透過強度を調べた。

【0475】その結果、ゲート光が無い場合はシグナル光はEIT層で吸収されるため、シグナル光の出力強度は入力に対して約15%にまで減少した。

【0476】一方、ゲート光が有る場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度約56%となり、ゲート光が無い場合と比較して、シグナル光は透過しやすくなることが確かめられた。

【0477】図59に、ゲート光の光子エネルギー ω_1 (周波数)は固定した状態で、シグナル光の光子エネルギー ω_2 (周波数)を変えながら準位3から準位1への吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、ゲート光の周波数 ω_1 は1024.5583cm⁻¹である。

【0478】図59より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位2・準位3間の準位間エネルギーの中心値 ω_{23} と一致する光子エネルギー付近で、 ω_2 の光吸収は大きく減少することがわかった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0479】(第17の実施形態) 本実施形態の光変調素子は、図46に示した光変調素子において、EIT層52としてZnSe/MgZnSe超格子を用いて、ゲート光53の光源およびシグナル光51の光源として赤外半導体レーザーを用い、そして、EIT層52の出力光を測定するために、フォトダイオード55、56の代わりに、MCT検出器を用いた構成となっている。

【0480】図60に、本実施形態で用いたZnSe/MgZnSe超格子の断面構造を示す。

【0481】ZnSe/MgZnSe超格子はZnSe基板上に形成されており、量子井戸層であるZnSe層の厚みは30nm、量子障壁層であるMgZnSe層の厚みは30nmである。また、ZnSe/MgZnSe超格子の全体の厚さは6 μ mである。

【0482】本実施形態では、このように量子障壁層を厚くすることで、量子井戸間の電子的な結合を抑え、エネルギー準位のボケにつながるサブバンド形成を抑制している。なお、アクセプター性不純物であるNをZnSe層にドーピングすることで価電子帯に正孔を注入した。

【0483】3つのエネルギー準位としてはZnSe層の価電子帯中の準位を用い、図61に示すように、一番上の準位1には E_{hh1} 準位、真ん中の準位2には E_{lh1} 準位、一番下の準位3には E_{hh2} 準位を選択した。

【0484】これより、本光変調素子では、上記3つの準位に関して、 $E_{lh1} \cdot E_{hh2}$ 準位間をV型に光励起した。ゲート光の光子エネルギー ω_1 には準位2・3間の $E_{hh2} \rightarrow E_{lh1}$ 遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 には準位1・3間の $E_{hh2} \rightarrow E_{hh1}$ 遷移に対応するものを選択した。

【0485】このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1・2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致するように調整した。なお、ゲート光の強度は1W、また、EIT層に入力するシグナル光の強度は1mWとした。

【0486】このように構成された光変調素子について、ゲート光の有無によるシグナル光の透過強度を調べた。

【0487】その結果、ゲート光が無い場合はシグナル光はEIT層で吸収されるため、シグナル光の出力強度

は入力に対して約11%にまで減少した。

【0488】一方、ゲート光が有る場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度約51となり、ゲート光が無い場合と比較して、シグナル光は透過しやすくなることが確かめられた。

【0489】図62に、ゲート光の光子エネルギー ω_1 (周波数)は固定した状態で、シグナル光の光子エネルギー ω_2 (周波数)を変えながら準位3から準位1への吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、ゲート光の周波数 ω_1 は1115.6902 cm⁻¹である。

【0490】図62より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1・準位2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致する周波数付近で、 ω_2 の光吸収は大きく減少することがわかった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0491】(第18の実施形態)図46に示した光変調素子をより具体化した例である。すなわち、EIT層52にはSi/NiSi₂量子井戸、ゲート光53の光源およびシグナル光51の光源として半導体レーザーを用いている。また、EIT層52から出力されるシグナル光51の強度はMCPにより測定されるようになって

いる。
【0492】図70に、本実施形態で用いたSi/NiSi₂量子井戸の断面構造を示す。Si/NiSi₂量子井戸はSi基板上に形成されており、量子井戸層であるNiSi₂層の厚みは5 nm、障壁層であるSi層の厚みは95 nmである。

【0493】本実施形態では、このように障壁層を厚くすることで、量子井戸間の電子的な結合を抑え、エネルギー準位のボケにつながるサブバンド形成を抑制している。なお、不純物としてSi層にBをドーピングし、NiSi₂層への正孔注入を行なった。

【0494】3つのエネルギー準位としては、NiSi₂層中の準位を用い、図71に示すように、一番上の準位1にはE_{h1}準位、真ん中の準位2にはE_{h2}準位、一番下の準位3にはE_{h3}準位をそれぞれ選択した。

【0495】なお、図71に示されるとおり、ここでのE_{h1}準位はNiSi₂層のフェルミ準位よりも高エネルギー、E_{h2}準位およびE_{h3}準位はNiSi₂層のフェルミ準位よりも低エネルギーの準位である。

【0496】これより、本光変調素子では、上記3つの準位に関して、E_{h1}・E_{h3}準位間とE_{h2}・E_{h3}準位間とをV型に光励起した。ゲート光の光子エネルギー ω_1 には準位2・3間のE_{h3}→E_{h2}遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 には準位1・3間のE_{h3}→E_{h1}に対応するものを選択した。

【0497】このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1・2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致するように調整した。なお、ゲート光の強度は1 W、またEIT層に入力するシグナル光の強度は1

mWとした。

【0498】このように構成された光変調素子について、ゲート光の有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。

【0499】その結果、ゲート光が無い場合は、シグナル光はEIT層で吸収され、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約12%となり、低い値にまで減少した。

【0500】一方、ゲート光が有る場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約54%となり、ゲート光が無い場合と比較して、シグナル光はは透過しやすくなることを確かめられた。

【0501】図72に、ゲート光の光子エネルギー ω_1 (周波数)を固定した状態で、シグナル光の光子エネルギー ω_2 を変えながら、準位3から準位1への吸収スペクトルを調べた結果を示す。なお、ゲート光の光子エネルギー ω_1 は2823.7011 cm⁻¹である。

【0502】図72より、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位1・2間の準位間エネルギーの中心値 ω_{12} と一致する光子エネルギー付近で、シグナル光の光吸収は大きく減少することがわかった。このことから、本現象がEITに由来することが理解される。

【0503】(第19の実施形態)本実施形態では、図7に示した光変調素子において、EIT層11にはCe³⁺が不純物として1 mol%分散しているYVO₄、ゲート光源として半導体レーザーの第二高調波、入力シグナル光S_{in}には色素レーザーの第二高調波をそれぞれ用い、さらにEIT層11から出力されるシグナル光の強度を測定するフォトダイオード14としてSiフォトダイオードを用いた構成とした。

【0504】まず、3つのエネルギー準位としてはYVO₄中のCe³⁺の不純物準位を用い、図67に示すように一番上の準位1には電子配置(d)の²E準位の中で結晶場で分裂したC1位、真ん中の準位2には電子配置(f)の²F_{7/2}準位の中で同じく結晶場で分裂したB1準位、一番下の準位3には基底状態である電子配置(f)の²F_{5/2}準位のうちやはり結晶場で分裂したA1準位をそれぞれ選択した。

【0505】各準位の対称性は、²E(c1)準位が Γ_6 、²F_{7/2}(b1)準位は Γ_7 、²F_{5/2}(A1)準位も Γ_7 である。これより、準位1・2間の²F_{7/2}(B1)→²E(C1)遷移は $\Gamma_7 \rightarrow \Gamma_6$ 、準位1・3間の²F_{5/2}(A1)→²E(C1)遷移も $\Gamma_7 \rightarrow \Gamma_6$ の遷移から構成され、準位2・3間の²F_{5/2}(A1)→²F_{7/2}(B1)遷移が $\Gamma_7 \rightarrow \Gamma_7$ の遷移から構成されている。電気双極子遷移に関する光学遷移の選択性からは、準位1・2間と準位1・3間の遷移が許容で、準位2・3間の遷移が禁制となる。

【0506】これより、本光変調素子ではこの3つの準位について、²F_{5/2}(A1)・²E(C1)準位間と²F_{7/2}(B1)・²E(C1)準位間をΛ型に光励起した。ゲート光の

93

光子エネルギー ω_1 は準位 1・2 間の $2F_{7/2} (B1) \rightarrow 2E (C1)$ 遷移に対応するものを選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 は準位 1・3 間の $2F_{5/2} (A1) \rightarrow 2E (C1)$ 遷移に対応するものを選択した。

【0507】このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位 2・3 間の準位間エネルギーの中心値 (2195 cm^{-1}) と一致するように調整した。なお、ゲート光の強度は 0.1 W、また EIT 層に入力するシグナル光の強度は 1 mW とした。

【0508】以上の素子構成に基づいて、ゲート光の有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。まず、ゲート光が無い場合はシグナル光は EIT 層 11 で吸収されるため、シグナル光の出力強度は入力に対して約 2% にまで減少した。次に、ゲート光を入れた場合は入力に対して約 81% の出力強度が得られ、ゲート光が無い場合と比較してシグナル光は著しく透過しやすくなることが確かめられた。

【0509】また、準位 2 として電子配置 (f) の $2F_{7/2} (B1)$ 準位に代わり、同じ電子配置 (f) であるが対称性が Γ_6 である $2F_{7/2} (B4)$ 準位を用い、これに伴いゲート光の光子エネルギー ω_1 を準位 1・2 間の $2F_{7/2} (B4) \rightarrow 2E (C1)$ 遷移に対応するものに変えた以外は、全く同様の構成の光変調素子を用いてゲート光の有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は 2428 cm^{-1} に調整してある。

【0510】まず、ゲート光が無い場合については、同様にシグナル光の出力強度は入力に対して約 2% にまで減少した。次に、ゲート光を入れた場合には、入力に対して約 24% の出力強度が得られ、ゲート光が無い場合と比較してシグナル光は透過し易くなることが確かめられた。

【0511】なお以上より、準位 1 として電子配置 (d) で特徴づけられる準位を用い、準位 2 および準位 3 として電子配置 (f) で特徴づけられる準位を用いて、 Λ 型励起により EIT を引き起こす場合、準位 2 と準位 3 の準位対称性が同じものを選んだときの方が、より大きな EIT シグナルが得られることがわかる。

【0512】(比較例 9) 準位 1 として電子配置 (d) の $2E$ 準位の中で結晶場で分裂した C2 準位 (準位対称性; Γ_7) を用い、準位 2 として同じく電子配置 (d) の $2E (1)$ 準位を用い、これに伴いゲート光の光子エネルギー ω_1 を準位 1・2 間の $2E (C1) \rightarrow 2E (C2)$ 遷移に対応するものに変え、さらにシグナル光の光子エネルギー ω_2 を準位 1・3 間の $2F_{5/2} (A1) \rightarrow 2E (C2)$ 遷移に対応するものに変えて、ゲート光の有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。

【0513】その結果、ゲート光が無い場合は、シグナル光の出力強度は入力に対して約 1% にまで減少した。

【0514】一方、ゲート光が有る場合も、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度約 1% となり、ゲ

94

ート光が無い場合と同様に、低い値であった。

【0515】これより、本比較例ではゲート光の有無によらずシグナル光はほとんど透過しないことがわかった。したがって、電子配置 (d) と電子配置 (f) で特徴づけられる準位をそれぞれ混ぜて用い、 Λ 型励起で EIT を引き起こす場合には、準位 1 だけに電子配置 (d) の準位を用い、準位 2 と準位 3 に電子配置 (f) の準位を用いることが極めて重要であることがわかる。

【0516】(第 20 の実施形態) 本実施形態の光変調素子は、図 7 に示した光変調素子において、EIT 層 11 として Ce^{3+} が不純物として 1 mol % 分散している YPO_4 、ゲート光の光源として半導体レーザーの第 2 高調波、シグナル光の光源として色素レーザーの第 2 高調波を用い、フォトダイオード 14 として Si フォトダイオードを用いた構成となっている。

【0517】まず、3つのエネルギー準位としては YPO_4 中の Ce^{3+} の不純物準位を用い、図 73 に示すように、一番上の準位 1 には電子配置 (d) の $2T_2$ 準位の中で結晶場で分裂した D1 準位、真ん中の準位 2 には電子配置 (d) の $2E$ 準位の中で同じく結晶場で分裂した C1 準位、一番下の準位 3 には基底準位である電子配置 (f) の $2F_{5/2}$ 準位のうちやはり結晶場で分裂した A1 準位をそれぞれ選択した。また、各準位の対称性は、 $2T_2 (D1)$ 準位が Γ_6 、 $2E (C1)$ 準位も Γ_6 、 $2F_{5/2} (A1)$ 準位が Γ_7 である。

【0518】これより、準位 1・2 間の $2E (C1) \rightarrow 2T_2 (D1)$ 遷移は $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_6$ の遷移から構成され、準位 1・3 間の $2F_{5/2} (A1) \rightarrow 2T_2 (D1)$ 遷移と準位 2・3 間の $2F_{5/2} (A1) \rightarrow 2E (C1)$ 遷移が $\Gamma_7 \rightarrow \Gamma_6$ の遷移から構成されている。電気双極子遷移に関する光学遷移の選択則からは、準位 1・2 間の遷移が禁制で、準位 1・3 間と準位 2・3 間の遷移が許容となる。

【0519】これより、本変調素子ではこの 3つの準位について、 $2F_{5/2} (A1) \cdot 2T_2 (D1)$ 準位間と $2F_{5/2} (A1) \cdot 2E (C1)$ 準位間を V 型に光励起した。ゲート光の光子エネルギー ω_1 は準位 2・3 間の $2F_{5/2} (A1) \rightarrow 2E (C1)$ 遷移に対応する物を選び、シグナル光の光子エネルギー ω_2 は準位 1・3 間の $2F_{5/2} (A1) \rightarrow 2T_2 (D1)$ 遷移に対応するものを選択した。

【0520】このときの光子エネルギー ω_1 、 ω_2 は、 $\omega_2 - \omega_1$ が準位 1・2 間の準位間エネルギーの中心値 (9590 cm^{-1}) と一致するように調整した。なお、ゲート光の強度は 0.1 W、また EIT 層に入力するシグナル光の強度は 1 mW とした。

【0521】このように構成された光変調素子について、ゲート光の有無によるシグナル光の透過光強度を調べた。

【0522】その結果、ゲート光が無い場合は、シグナ

95

ル光はEIT層で吸収され、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約3%となり、低い値にまで減少した。

【0523】一方、ゲート光が有る場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約64%となり、ゲート光が無い場合と比較して、シグナル光は著しく透過しやすくなることを確認した。

【0524】また、準位2として電子配置(d)の $2E(C1)$ 準位の代わりに、同じ電子配置(d)であるが対称性が Γ_7 である $2E(C2)$ 準位を用い、これに伴いゲート光の光子エネルギー ω_1 を準位2・3間の $2F_{5/2}(A1) \rightarrow 2E(C2)$ 遷移に対応するものに変えた以外は全く同様の構成の光変調素子を用いてゲート光の有無によるシグナル光の透過強度を調べた。なお、 $\omega_2 - \omega_1$ は 7836 cm^{-1} に調整してある。

【0525】その結果、ゲート光が無い場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約3%となり、低い値にまで減少した。

【0526】一方、ゲート光が有る場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約18%となり、ゲート光が無い場合と比較して、シグナル光は透過しやすくなることを確認した。

【0527】なお、以上より、準位1および準位2として電子配置(d)で特徴づけられる準位を用い、準位3として電子配置(f)で特徴づけられる準位を用いてV型励起によりEITを引き起こす場合、準位1と準位2の準位対称性が同じものを選んだときの方が、より大きなEITシグナルが得られることが分かる。

【0528】(比較例10) 準位2として電子配置(f)の $2F_{7/2}$ 準位の中で結晶場で分裂した $B1$ 準位を用い、これに伴いゲート光の光子エネルギー ω_1 を準位2・3間の $2F_{5/2}(A1) \rightarrow 2F_{7/2}(B1)$ 遷移に対応するものに変えて、ゲート光の有無によるシグナル光の透過強度を調べた。

【0529】その結果、ゲート光が無い場合は、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約3%となり、低い値にまで減少した。

【0530】一方、ゲート光が有る場合も、シグナル光の出力強度は、シグナル光の入力強度の約3%となり、低い値にまで減少した。

【0531】これより本比較例ではゲート光の有無によらずシグナル光はほとんど透過しないことがわかった。したがって、電子配置(d)と電子配置(f)で特徴づけられる準位をそれぞれ混ぜて用い、V型励起でEITを引き起こす場合には、準位1と準位2に電子配置(d)の準位を用い、準位3だけに電子配置(f)の準位を用いることが極めて重要であることがわかる。

【0532】(第21の実施形態) 図65は、本実施形態の光素子の中から、 Λ 型3準位の中で準位1・2間を仮想的に励起する制御光と、準位4を経由して準位3か

96

ら準位2へ電子をポンピングするポンプ光を用いることで、反転分布無しでレーザー発振が可能になるLWIレーザーを模式的に示したものである。

【0533】このLWIレーザーは、向かい合う2枚のミラー61で挟まれたEIT層62と、制御光をEIT層62に入射する制御用の半導体レーザー63と、ポンプ光をEIT層62に入射するポンプ用の半導体レーザー64と、ミラー61から外に向けて出射されるLWIレーザー光を検出するためのSiフォトダイオード65と、このフォトダイオード65とミラー61との間に設けられ、半導体レーザー63のレーザ光と同じ波長の光をカットするフィルタ66とから構成されている。

【0534】図66は、EIT層62中のエネルギー準位と入射する2本の光、ならびに発生するLWIレーザー光を模式的に示したものである。

【0535】EIT層62に用いる材料としては、準位2・3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{23} が準位1・2間、準位1・3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{12} 、 σ_{13} に対して $\sigma_{23} \leq \sigma_{12}$ 、並びに $\sigma_{23} \leq \sigma_{13}$ を満足する系を選択する。

【0536】また、制御光は準位1・2間を仮想的に励起し、ポンプ光は準位4を経由して準位2に電子をポンピングする。この様に構成したとき、LWIレーザー光は制御光に沿って発生する。その光子エネルギー ω_2 は、制御光の光子エネルギーを ω_1 、準位2・3間のエネルギー差の中心値を ω_{23} とすると、 $\omega_2 = \omega_1 + \omega_{23}$ である。

【0537】次に本実施形態のLWIレーザーについてより具体的に説明する。

【0538】EIT層62としては Pr^{3+} が不純物として1mol%分散している $LiYF_4$ 、制御光としては半導体レーザーの第二高調波、ポンプ光には半導体レーザーの基本波を用いる。

【0539】3つのエネルギー準位としては $LiYF_4$ 中の Pr^{3+} の不純物準位を用い、図68に示すように一番上の準位1には電子配置(f)(d)の $3T_1$ 準位のうち結晶場で分裂した $X1$ 準位、真ん中の準位2には電子配置(f) 2 の $1D_2$ 準位のうち同じく結晶場で分裂した $C1$ 準位、一番下の準位3には基底準位である電子配置(f) 2 の $3H_4$ 準位のうちやはり結晶場で分裂した $A1$ 準位をそれぞれ選択した。

【0540】各準位の対称性は、 $3T(x1)$ 準位が Γ_3 、 $1D_2(C1)$ 準位は Γ_2 、 $3H_4(A1)$ 準位も Γ_2 である。

【0541】これより、準位1・2間の $1D_2(C1) \rightarrow 3T_1$ 遷移は $\Gamma_2 \rightarrow \Gamma_3$ 、準位1・3間の $3H_4(A1) \rightarrow 3T_1(X1)$ 遷移も $\Gamma_2 \rightarrow \Gamma_3$ の遷移から構成され、準位2・3間の $3H_4(A1) \rightarrow 1D_2(C1)$ 遷移が $\Gamma_2 \rightarrow \Gamma_2$ の遷移から構成されている。電気双極子遷移に関する光学遷移の選択則からは、準位1・2間と準位1・3間の遷移が許容で、準位2・3間の遷移が禁制となる。

【0542】また、準位3から準位2へ電子をポンピングするための準位4としては、 $1D_2$ (C2)準位 (対称性; Γ_1) を選んだ。 $1D_2$ (C2)準位の対称性は Γ_1 であるため、選択則から $3H_4$ (A1) $\rightarrow 1D_2$ (C1)遷移は許容となる。 $1D_2$ (C2)準位に励起された電子は光子振動によって $1D_2$ (C1)準位へ素早く緩和する。したがって、 $1D_2$ (C2)準位に電子励起を行えば $1D_2$ (C1)準位にポピュレーションを形成することが可能になる。

【0543】これより、本LWIレーザーでは、 $1D_2$ (C1)・ $3T_1$ (X1)準位間を光励起しながら、 $3H_4$ (A1)準位から $1D_2$ (C1)準位へ電子を光ポンピングした。制御光の光子エネルギー ω_1 は準位1・2間の $1D_2$ (C1)準位へ電子を光ポンピングした。

【0544】制御光の光子エネルギー ω_1 は準位1・2間の $1D_2$ (C1) $\rightarrow 3T_1$ (X1)遷移に対応するものを選び、ポンプ光の光子エネルギーは準位4・3間の $3H_4$ (A1) $\rightarrow 1D_2$ (C2)遷移に対応するものを選択した。なお、制御光の強度は0.1W、ポンプ光の強度は1Wとした。

【0545】以上の素子構成に基づいて、 $3T_1$ (X1)準位から $3H_4$ (A1)準位へのレーザー発振の有無を調べた。その結果、図69に示すように、 $3T_1$ (X1) $\rightarrow 3H_4$ (A1)遷移に対応する 44840 cm^{-1} 付近においてレーザー光の連続発振を観測した。そのときの強度はおおよそ0.05mWであった。

【0546】さらに、本実施形態の光素子の中から、準位1・準位2間エネルギーの標準偏差 σ_{12} が準位1・準位3間、準位2・準位3間の準位間エネルギーの標準偏差 σ_{13} 、 σ_{23} に対して $\sigma_{12} \leq \sigma_{13}$ ならびに $\sigma_{12} \leq \sigma_{23}$ を満足する、例えば、第20の実施形態の材料系をEIT層に用いた場合について、V型3準位の中で準位2・準位3間を励起する制御光と、準位2または準位3から準位1へ電子をポンピングするポンプ光を用いることで、同様にレーザー光の発振を観測することができた。なお、本発明は上述した実施形態に限定されるものではない。例えば、上記実施形態では、光素子として光変調素子や短波長LWIレーザーについて説明したが、その他の量子コヒーレンスに基づく様々な光素子にも適用できる。

【0547】さらに、本発明と磁性・電気伝導性・強誘電性など固体の持つ様々な物性とを組み合わせることで、従来の電子素子とは異なる新しいタイプの機能素子の実現も可能となる。

【0548】また、上記実施形態では、外場として電場、磁場を例にあげて説明したが、他の外場としては圧力をあげることができる。さらに、これら外場を組み合わせても良い。

【0549】また、材料としては、上記実施形態にあげたものの他に、手段の項で述べた種々の材料の使用が可能である。例えば、超格子や量子細線、量子箱などの量子構造を有する、C、Si、Ge、B、Al、Ca、I

n、N、P、As、Sb、Zn、Cd、S、Se、Teなどの元素のうち、少なくとも一種以上元素から構成されるIV族、III-V族、II-VI族などの半導体材料を用いることも可能である。その他、本発明の技術的範囲において種々変形して実施できる。

【0550】

【発明の効果】以上詳説したように、本発明 (請求項1～請求項15、請求項22～請求項25) によれば、本発明者等が初めて見出した準位間エネルギーの標準偏差に係る条件式を満足することにより、固体中のエネルギー準位に大きなバラつきが有る場合でも、ほとんどすべての不純物または量子構造で同時にEITに基づく光吸収の消失が誘起されるので、量子コヒーレンスを基本原理とした実用レベルの光素子を実現できるようになる。

【0551】また、本発明 (請求項16～請求項21) によれば、本発明者等が初めて見出した条件を満たす材料を作り出すことにより、固体中のエネルギー準位に大きなバラつきが有る場合でも、ほとんどすべての不純物または量子構造で同時にEITに基づく光吸収の消失が誘起されるので、量子コヒーレンスを基本原理とした実用レベルの光素子を実現できるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】EITの基本原理を説明するための図

【図2】原子ガスのEITによる光吸収スペクトルを示す図

【図3】準位間エネルギーが大きくかつランダムに分布している擬原子集団に対して予測されるEIT特性を説明するための図

【図4】擬原子集団の多数の擬原子が Λ 型励起されて同時に光吸収ゼロとなるための各準位間エネルギーに要求される条件を説明するための図

【図5】擬原子集団の多数の擬原子がV型励起されて同時に光吸収ゼロとなるための各準位間エネルギーに要求される条件を説明するための図

【図6】擬原子集団の多数の擬原子が Ξ 型励起されて同時に光吸収ゼロとなるための各準位間エネルギーに要求される条件を説明するための図

【図7】本発明の一実施形態に係わる光変調素子の構成を示す模式図

【図8】図7の光変調素子のEIT層中のエネルギー準位とゲート光とシグナル光との関係を示す図

【図9】 Al_2O_3 中に分散された Cr^{3+} のエネルギー準位を示す図

【図10】 Al_2O_3 中に分散された Cr^{3+} の光吸収スペクトルを示す図。

【図11】図7の光変調素子のEIT層の材料として Cr^{3+} が分散された Al_2O_3 を用いた場合において、ゲート光の光子エネルギーを固定した状態でシグナル光の光子エネルギーを変化させながら調べた Cr^{3+} の光吸収

スペクトルを示す図

【図 1 2】 LiYF_4 中に分散された Er^{3+} のエネルギー準位を示す図。

【図 1 3】 図 7 の光変調素子の EIT 層の材料として Er^{3+} が分散された LiYF_4 を用いた場合において、ゲート光の光子エネルギーを固定した状態でシグナル光の光子エネルギーを変化させながら調べた Er^{3+} の光吸収スペクトルを示す図

【図 1 4】 LiYF_4 中に分散された Pr^{3+} のエネルギー準位を示す図

【図 1 5】 立方対称の結晶場中におかれた d 電子を 1 個持つ遷移金属イオンを模式的に示す図

【図 1 6】 結晶場中におかれた d 電子を 1 個持つ遷移金属イオンのエネルギー準位を示す図

【図 1 7】 電子配置 (t_{2g}) のエネルギー準位を示す図

【図 1 8】 電子配置 (t_{2g}) (e_g) のエネルギー準位を示す図

【図 1 9】 固体中の縮退した不純物準位を外場で解き、その中の 2 準位を Λ 型 3 準位または V 型 3 準位の中で、光で結ばれない 2 準位として利用している様子を模式的に示す図

【図 2 0】 幅 L、高さが無限大の 1 次元量子井戸において、電子が取り得る離散的なエネルギー準位を定性的に説明するための図

【図 2 1】 量子井戸中に形成された 3 準位と 2 本の光との関係を示す定性的なエネルギーバンド図

【図 2 2】 他の量子井戸中に形成された 3 準位と 2 本の光との関係を示す定性的なエネルギーバンド図

【図 2 3】 さらに別の量子井戸中に形成された 3 準位と 2 本の光との関係を示す定性的なエネルギーバンド図

【図 2 4】 本発明の第 5 の実施形態に係わる光変調素子を模式的に示す図

【図 2 5】 第 5 の実施形態の光変調素子の EIT 層中のエネルギー準位と 2 本の光との関係を示す図

【図 2 6】 第 6 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Gd^{3+} ; LiYF_4 中の Gd^{3+} 不純物のエネルギー準位を示す図

【図 2 7】 第 6 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Gd^{3+} ; LiYF_4 中の Gd^{3+} 不純物のエネルギー準位の中で、 $^8S_{7/2}$ (a) \cdot $^8S_{7/2}$ (b) 準位間の準位間エネルギーの電界強度依存性を示す図

【図 2 8】 第 6 の実施形態の光変調素子において光子エネルギー ω_1 を固定した状態で、光子エネルギー ω_2 を変化させながら Gd^{3+} 不純物の光吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 2 9】 第 7 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Pr^{3+} ; LaCl_3 中の Pr^{3+} 不純物のエネルギー準位を示す図

【図 3 0】 第 7 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Pr^{3+} ; LaCl_3 中の Pr^{3+} 不純物のエネルギー準位の中で、 3H_4 (a) \cdot 3H_4 (b) 準位間の準位間エネルギーの電界強度依存性を示す図。

【図 3 1】 第 7 の実施形態の光変調素子において光子エネルギー ω_1 を固定した状態で、光子エネルギー ω_2 を変化させながら Pr^{3+} 不純物の光吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 3 2】 第 8 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Eu^{3+} ; Y_2O_3 中の Eu^{3+} 不純物のエネルギー準位を示す図

【図 3 3】 第 8 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Eu^{3+} ; Y_2O_3 中の Eu^{3+} 不純物のエネルギー準位の中で、 5D_1 (a) \cdot 5D_1 (b) 準位間の準位間エネルギーの電界強度依存性を示す図

【図 3 4】 第 8 の実施形態の光変調素子において光子エネルギー ω_1 を固定した状態で、光子エネルギー ω_2 を変化させながら Eu^{3+} 不純物の光吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 3 5】 第 9 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Sm^{2+} ; BaClF 中の Sm^{2+} 不純物のエネルギー準位を示す図

【図 3 6】 第 9 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Sm^{2+} ; BaClF 中の Sm^{2+} 不純物のエネルギー準位の中で、 5D_1 (a) \cdot 5D_1 (b) 準位間の準位間エネルギーの電界強度依存性を示す図

【図 3 7】 第 9 の実施形態の光変調素子において光子エネルギー ω_1 を固定した状態で、光子エネルギー ω_2 を変化させながら Sm^{2+} 不純物の光吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 3 8】 本発明の第 10 の実施形態に係わる光変調素子を模式的に示す図

【図 3 9】 第 10 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Er^{3+} ; $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 中の Er^{3+} 不純物のエネルギー準位を示す図

【図 4 0】 第 10 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた Er^{3+} ; $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 中の Er^{3+} 不純物のエネルギー準位の中で、 $^4I_{15/2}$ (a) \cdot $^4I_{15/2}$ (b) 準位間の準位間エネルギーの磁場強度依存性を示す図。

【図 4 1】 第 10 の実施形態の光変調素子において光子エネルギー ω_1 を固定した状態で、光子エネルギー ω_2 を変化させながら Er^{3+} 不純物の光吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 4 2】 第 11 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた InAs/GaSb 超格子を示す断面図

【図 4 3】 第 11 の実施形態の光変調素子において EIT 層として用いた InAs/GaSb 超格子中の量子井戸準位を示す図

101

【図 4 4】第 1 1 の実施形態の光変調素子において E I T 層として用いた I n A s / G a S b 超格子中の E₁ 準位に関して、この準位から分裂したランダウ準位間の準位エネルギーの磁場強度依存性を示す図

【図 4 5】第 1 1 の実施形態の光変調素子において光子エネルギー ω_1 を固定した状態で光子エネルギー ω_2 を変化させながら I n A s / G a S b 超格子の光吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 4 6】本発明の第 1 2 の実施形態に係わる光変調素子を模式的に示す図

【図 4 7】図 4 6 の光変調素子の E I T 層中のエネルギー準位とゲート光、シグナル光との関係を模式的に示す図

【図 4 8】本発明の第 1 3 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての G a A s / A l G a A s 超格子の断面構造を示す図

【図 4 9】本発明の第 1 3 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての G a A s / A l G a A s 超格子の量子井戸準位を示す図

【図 5 0】本発明の第 1 3 の実施形態に係わる光変調素子において、ゲート光の光子エネルギーを固定した状態で、シングル光の光子エネルギーを変えながら、準位 3 から準位 1 への吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 5 1】本発明の第 1 4 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての I n G a N / A l G a N 超格子の断面構造を示す図

【図 5 2】本発明の第 1 4 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての I n G a N / A l G a N 超格子の量子井戸準位を示す図

【図 5 3】本発明の第 1 4 の実施形態に係わる光変調素子において、ゲート光の光子エネルギーを固定した状態で、シングル光の光子エネルギーを変えながら、準位 3 から準位 1 への吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 5 4】本発明の第 1 5 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての Z n S e / M g Z n S e S 超格子の断面構造を示す図

【図 5 5】本発明の第 1 5 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての Z n S e / M g Z n S e S 超格子の量子井戸準位を示す図

【図 5 6】本発明の第 1 5 の実施形態に係わる光変調素子において、ゲート光の光子エネルギーを固定した状態で、シングル光の光子エネルギーを変えながら、準位 3 から準位 1 への吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 5 7】本発明の第 1 6 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての G a A s / A l G a A s 超格子の断面構造を示す図

【図 5 8】本発明の第 1 6 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての G a A s / A l G a A s 超格子の量子井戸準位を示す図

【図 5 9】本発明の第 1 6 の実施形態に係わる光変調素

102

子において、ゲート光の光子エネルギーを固定した状態で、シングル光の光子エネルギーを変えながら、準位 3 から準位 1 への吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 6 0】本発明の第 1 7 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての Z n S e / M g Z n S e S 超格子の断面構造を示す図

【図 6 1】本発明の第 1 7 の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての Z n S e / M g Z n S e S 超格子の量子井戸準位を示す図

10 【図 6 2】本発明の第 1 7 の実施形態に係わる光変調素子において、ゲート光の光子エネルギーを固定した状態で、シングル光の光子エネルギーを変えながら、準位 3 から準位 1 への吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 6 3】量子コヒーレンスに基づく L W I の基本原理を説明するための図

【図 6 4】量子コヒーレンスに基づく L W I レーザを説明するための図

【図 6 5】本発明の第 2 1 の実施形態に係わる L W I レーザを模式的に示す図

20 【図 6 6】図 6 5 の L W I レーザの E I T 層のエネルギー準位と制御光、ポンプ光の関係を示す図

【図 6 7】本発明の第 1 9 の実施形態に係わる L W I レーザの E I T 層のエネルギー準位を示す図

【図 6 8】本発明の第 2 1 の実施形態に係わる L W I レーザの E I T 層のエネルギー準位を示す図

【図 6 9】本発明の第 2 1 の実施形態に係わる L W I レーザの L W I 発振スペクトルを調べた結果を示す図

【図 7 0】本発明の第 1 8 の実施形態の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての S i / N i S i₂ の断面図

30 【図 7 1】本発明の第 1 8 の実施形態の実施形態に係わる光変調素子の E I T 層としての S i / N i S i₂ のエネルギー準位を示す図

【図 7 2】本発明の第 1 8 の実施形態に係わる光変調素子において、ゲート光の光子エネルギーを固定した状態で、シングル光の光子エネルギーを変えながら、準位 3 から準位 1 への吸収スペクトルを調べた結果を示す図

【図 7 3】本発明の第 2 0 の実施形態の光変調素子において E I T 層として用いた C e³⁺; Y P O₄ 中の C e³⁺ 不純物のエネルギー準位を示す図

40 【符号の説明】

1 1 … E I T 層 (不純物を含む固体)

1 2 … 半導体レーザー (光照射手段)

1 3 … 光ファイバ (光照射手段)

1 4 … フォトダイオード

G … ゲート光 (第 1 の光)

S_{in} … 入力シグナル光 (第 2 の光)

2 1 … 光 (第 1 の光)

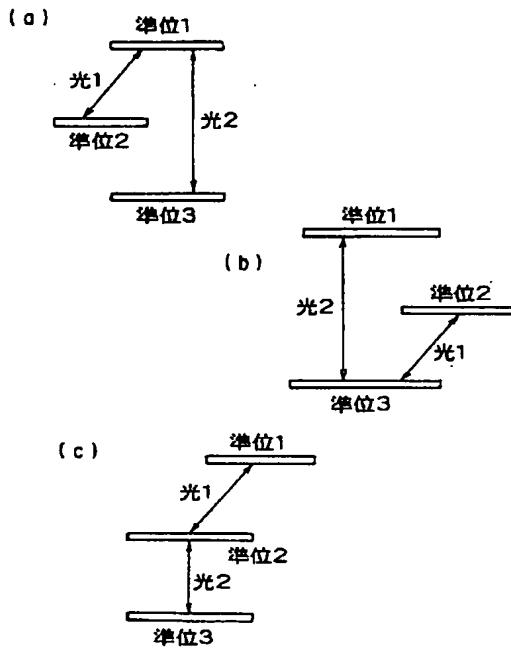
2 2 … 光 (第 2 の光)

50 2 3 … E I T 層 (不純物を含む固体)

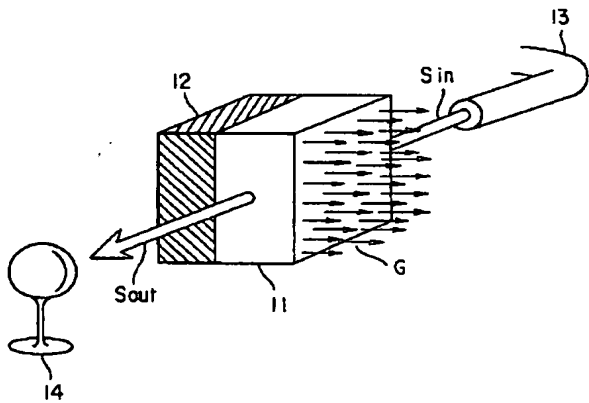
103

24, 25…電極
 26…電源
 27, 28…光ファイバー (光照射手段)
 29, 30…フォトダイオード
 31, 32…電磁石
 40…InAs/GaSb超格子
 41, 42…電磁石
 43…GaSb基板

【図1】



【図7】

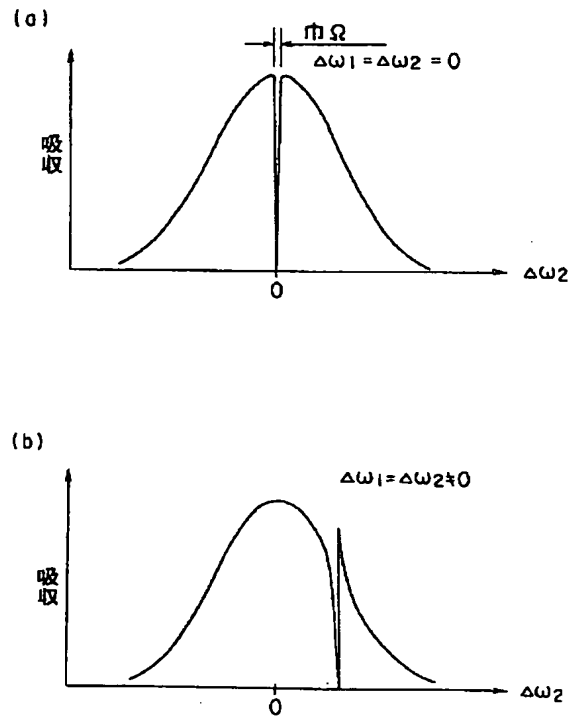


104

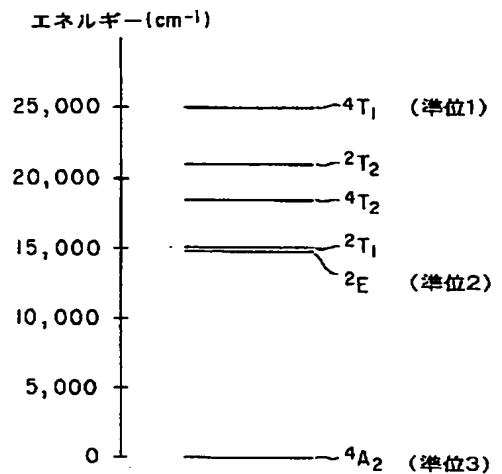
* 50…支持体
 51…シグナル光
 52…EIT層
 53…ゲート光
 54…光ファイバー
 55, 56…フォトダイオード
 57…光ファイバー

*

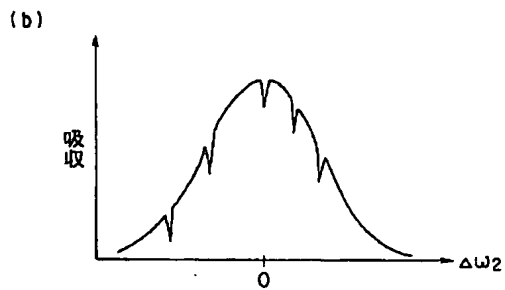
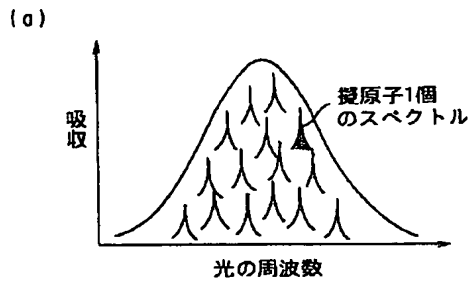
【図2】



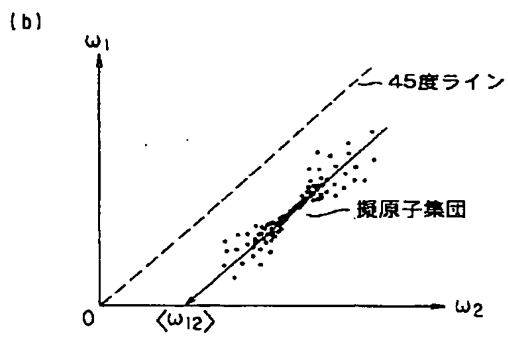
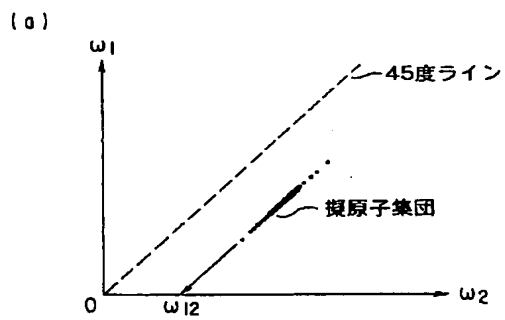
【図9】



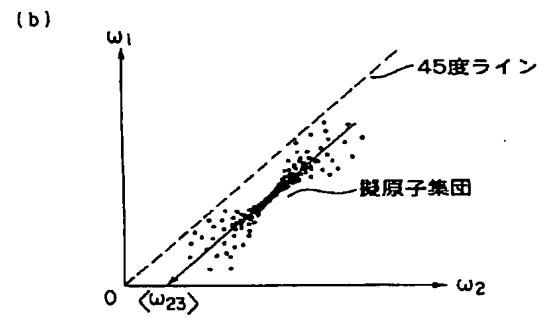
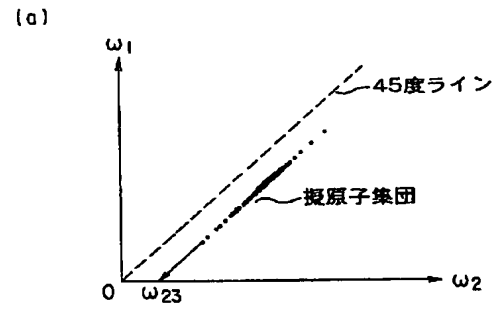
【図3】



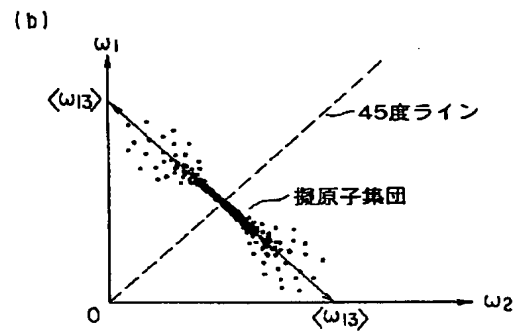
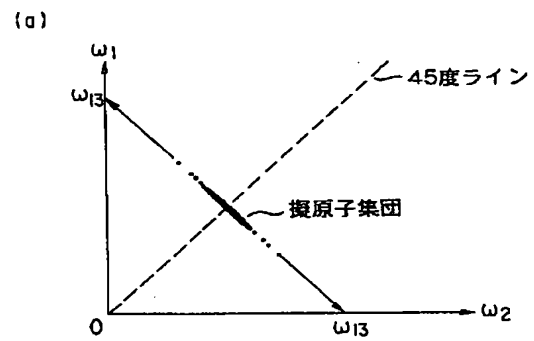
【図5】



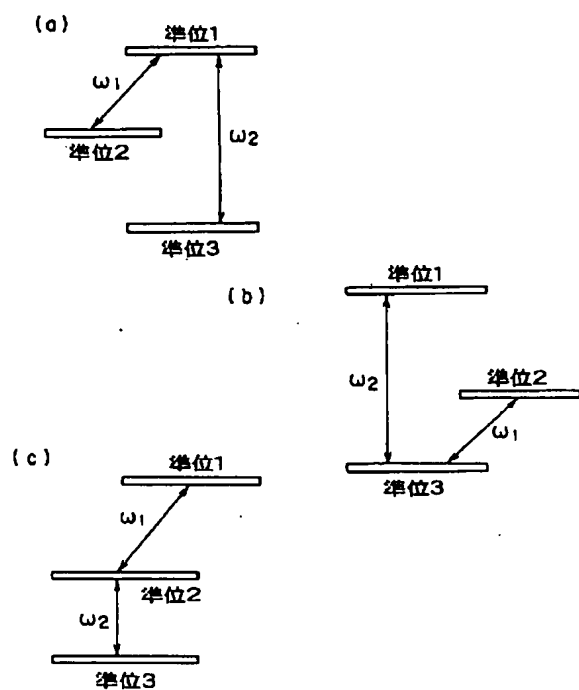
【図4】



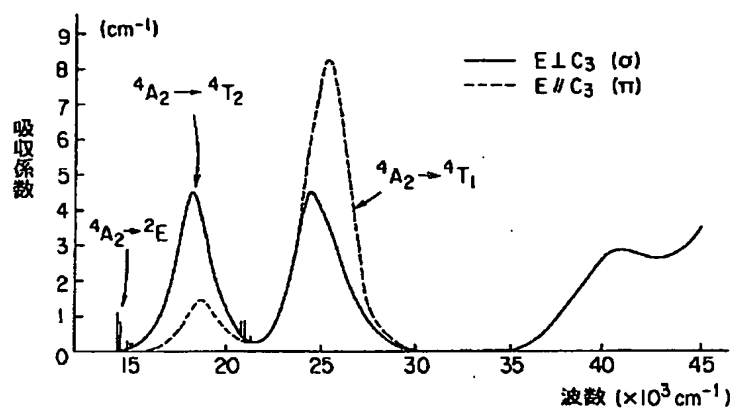
【図6】



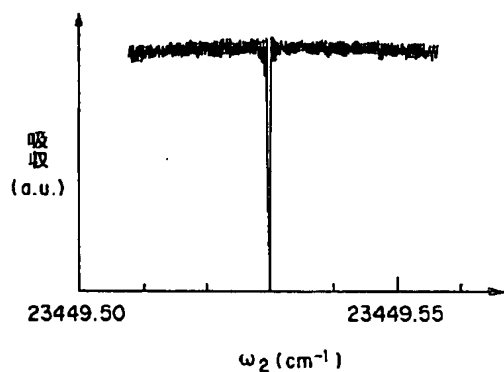
【図 8】



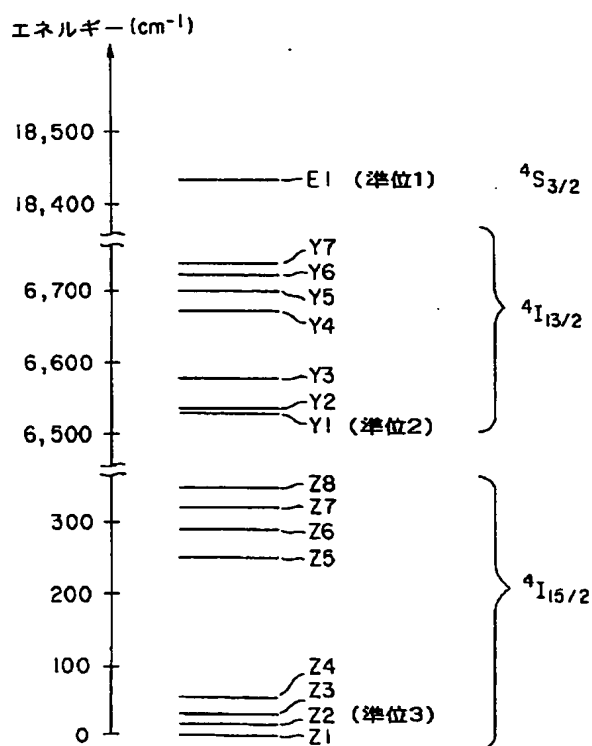
【図 10】



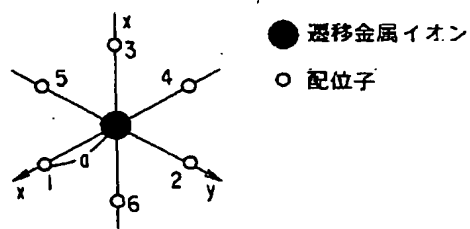
【図 11】



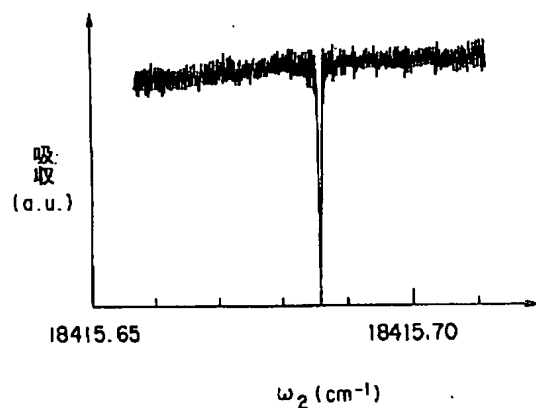
【図 12】



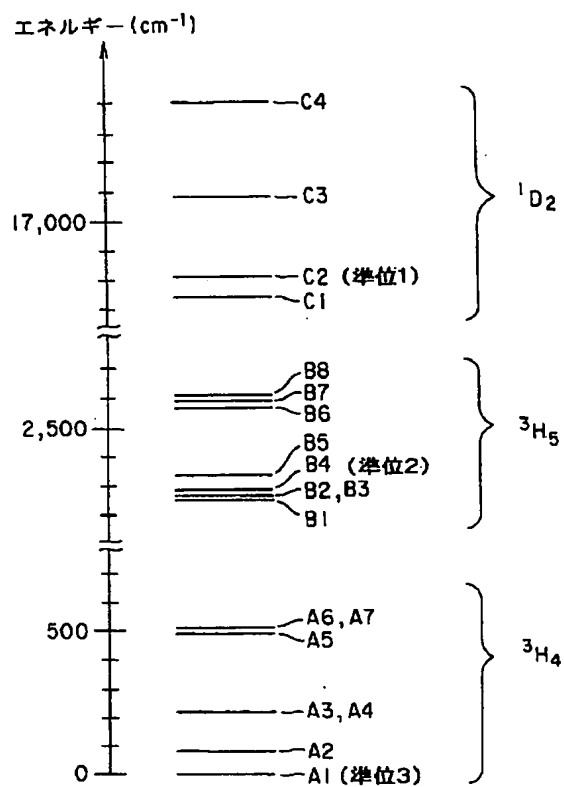
【図 15】



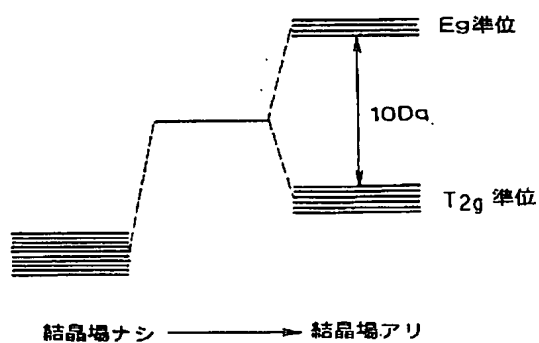
【図13】



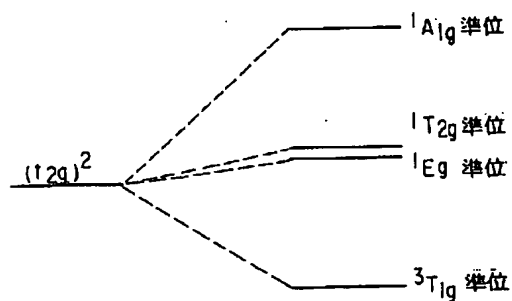
【図14】



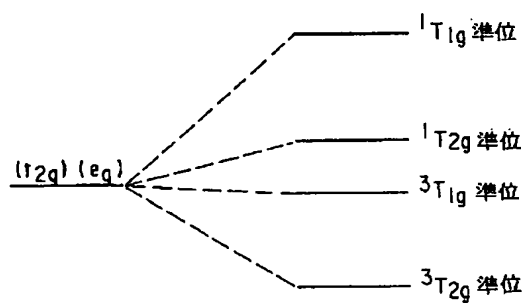
【図16】



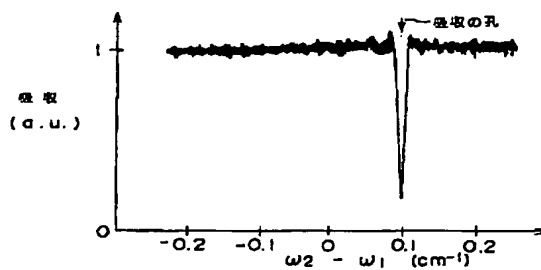
【図17】



【図18】

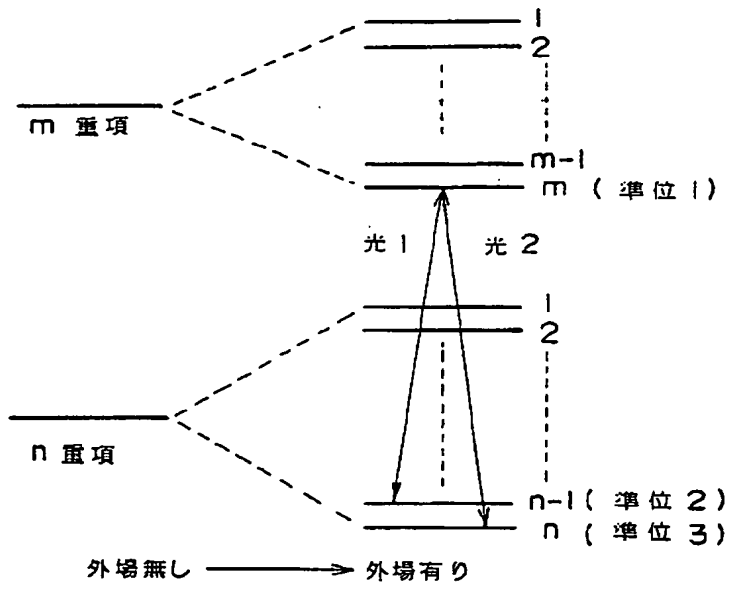


【図28】

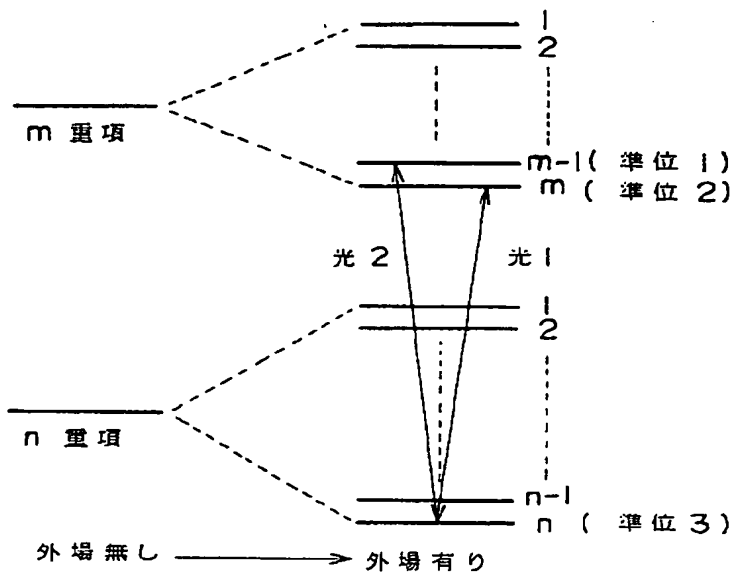


【図 19】

(a)

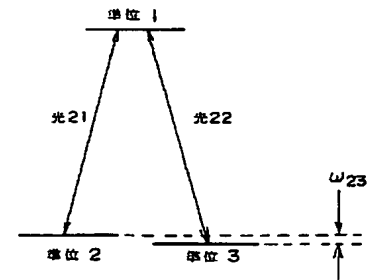


(b)

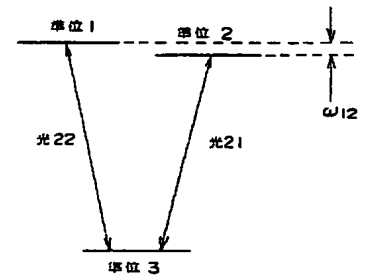


【図 25】

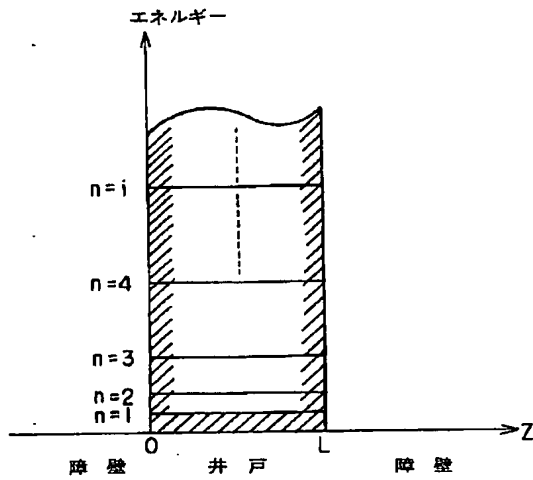
(a)



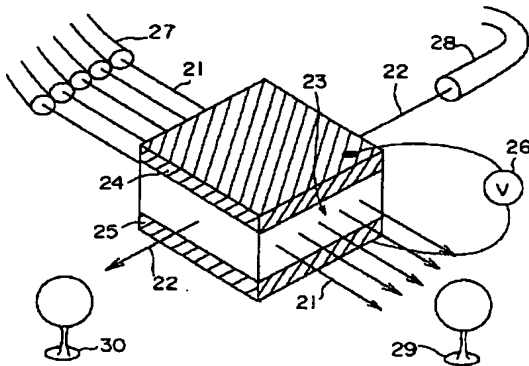
(b)



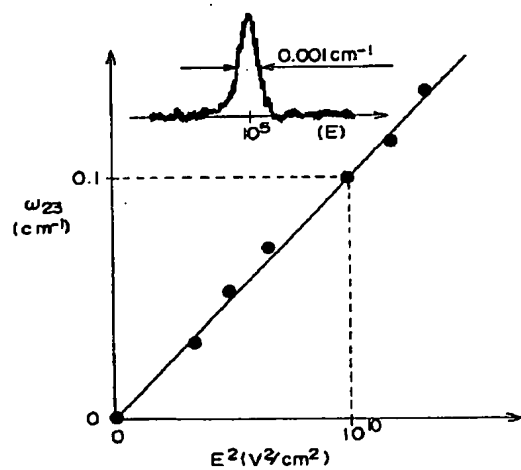
【図 20】



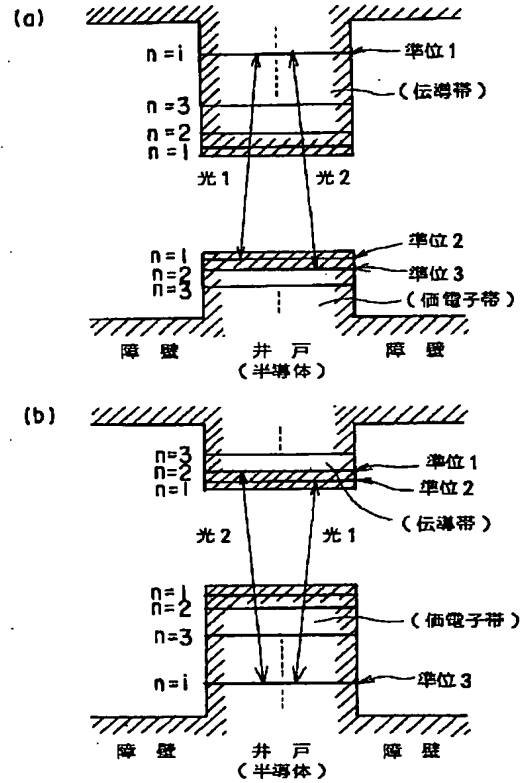
【図 24】



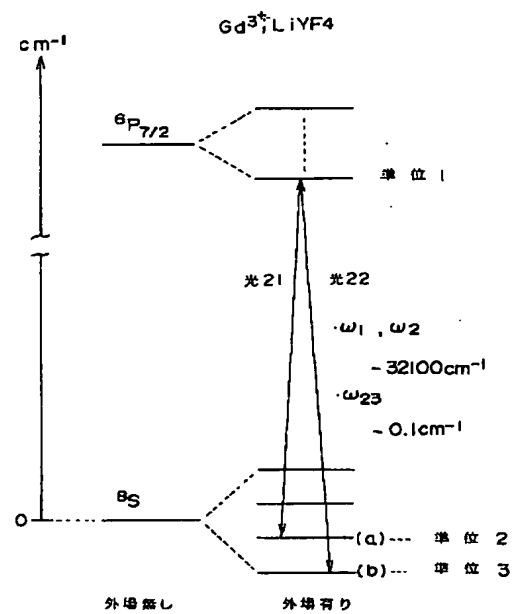
【図 27】



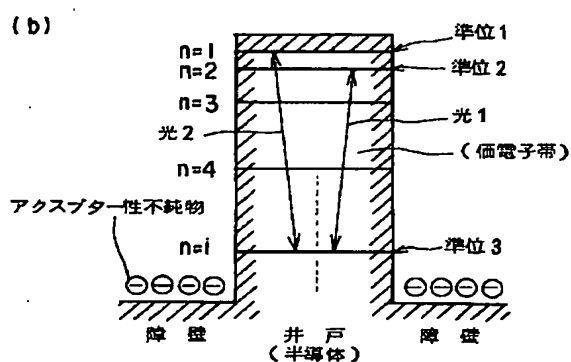
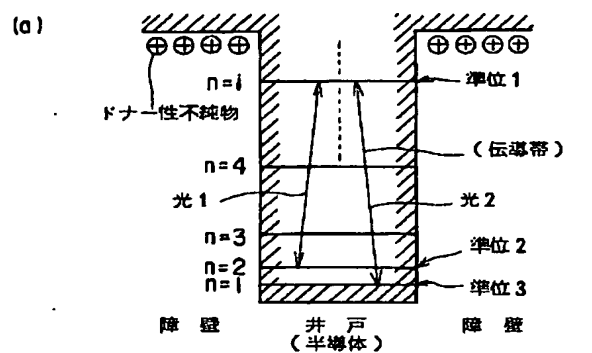
【図 21】



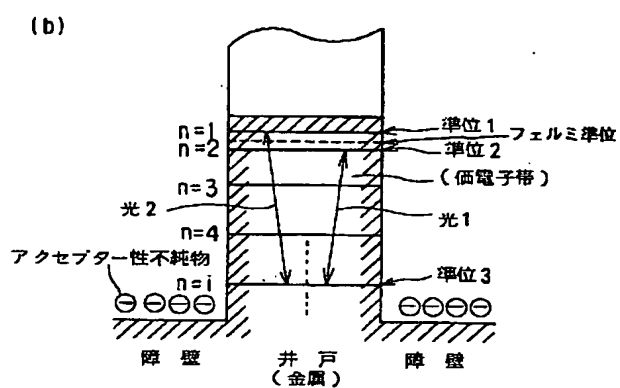
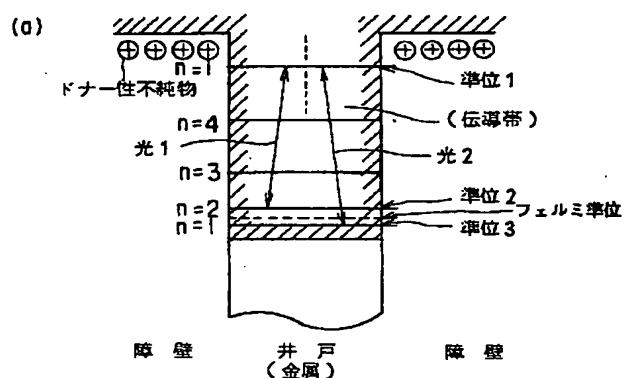
【図 26】



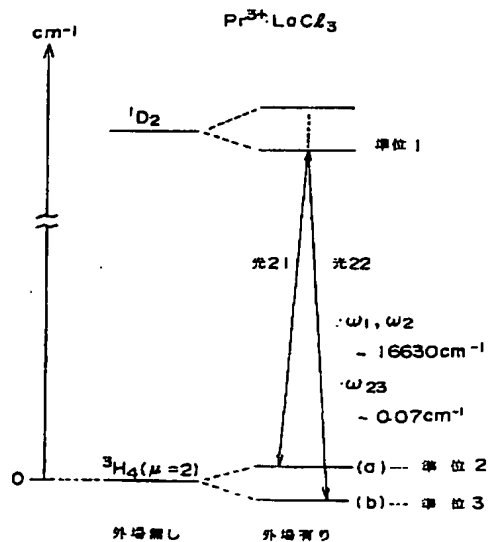
【図 2 2】



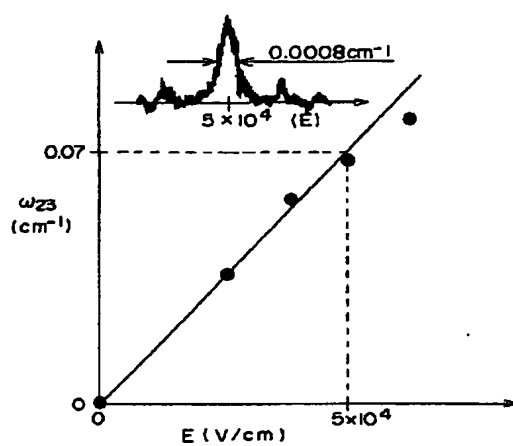
【図 2 3】



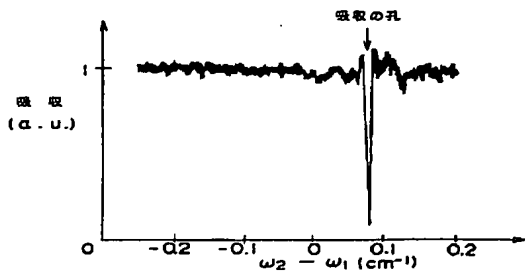
【図 2 9】



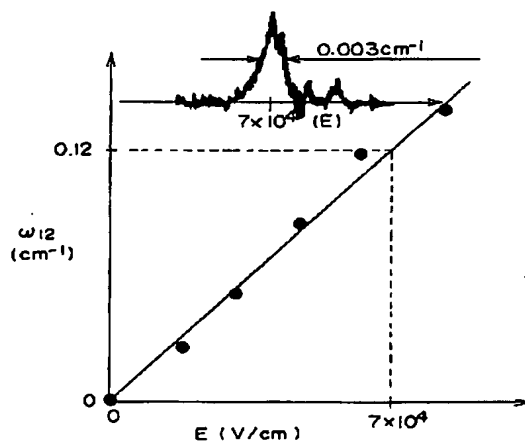
【図 3 0】



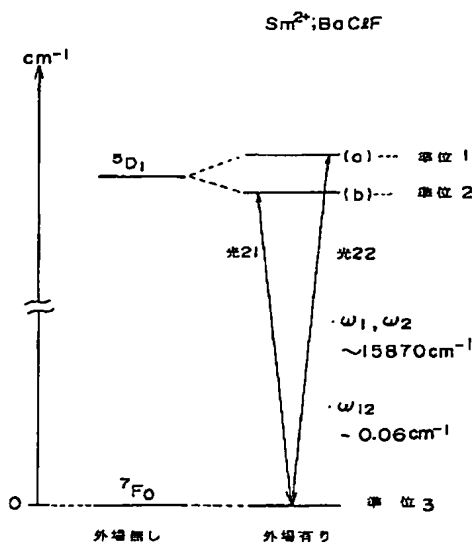
【図31】



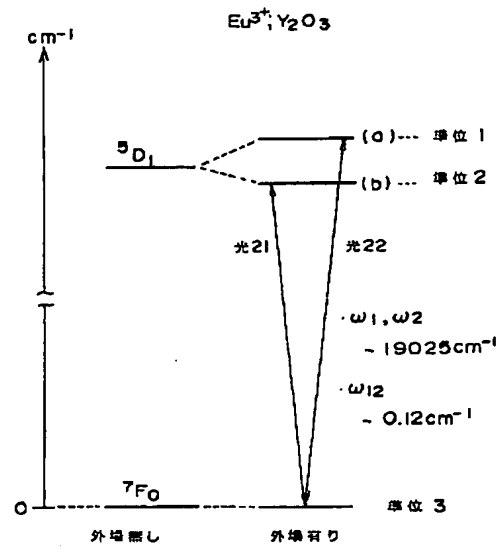
【図33】



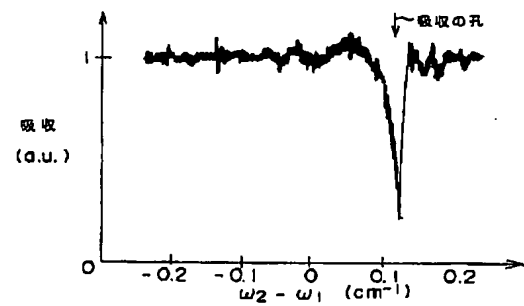
【図35】



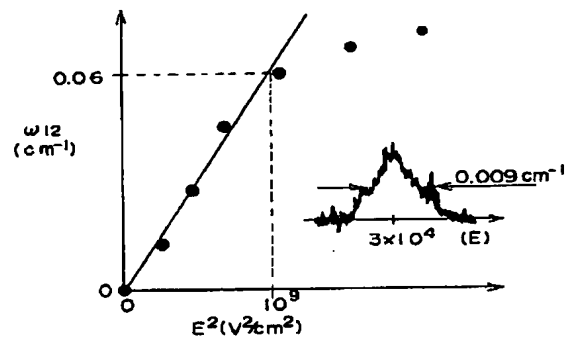
【図32】



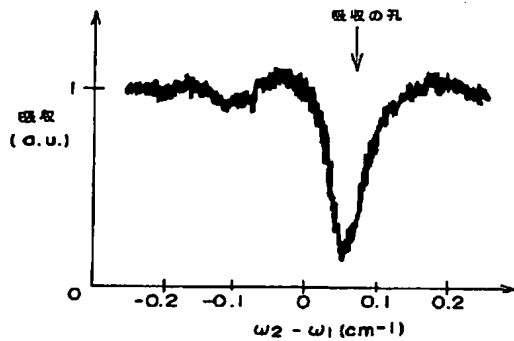
【図34】



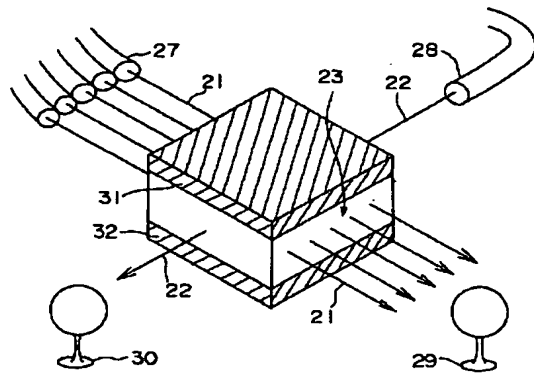
【図36】



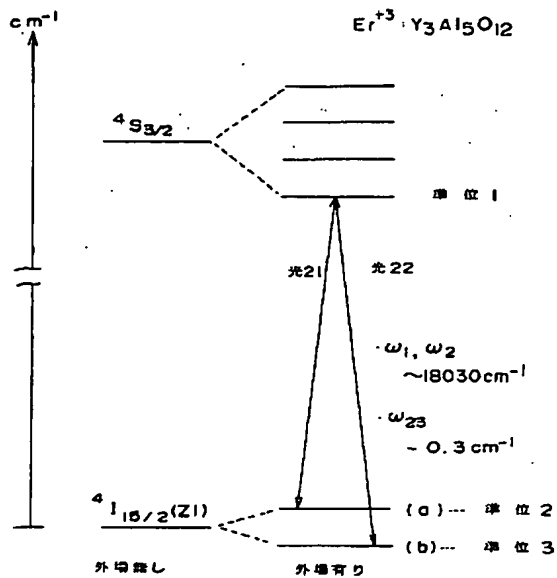
【図37】



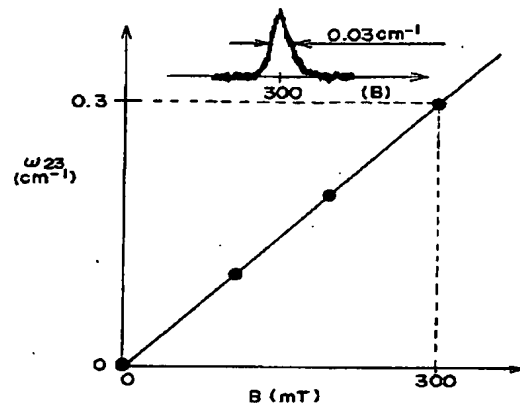
【図38】



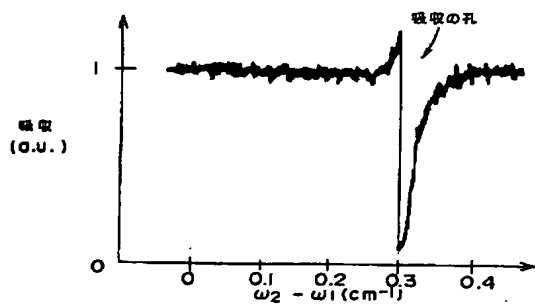
【図39】



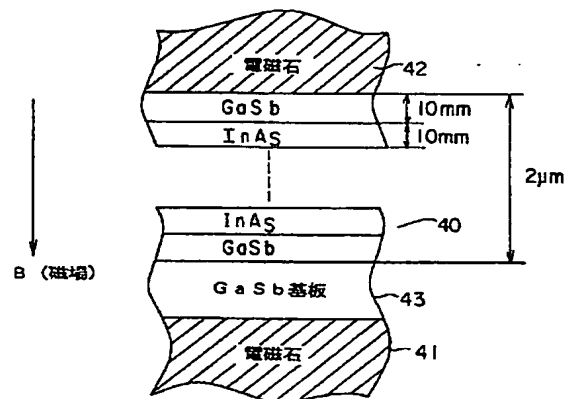
【図40】



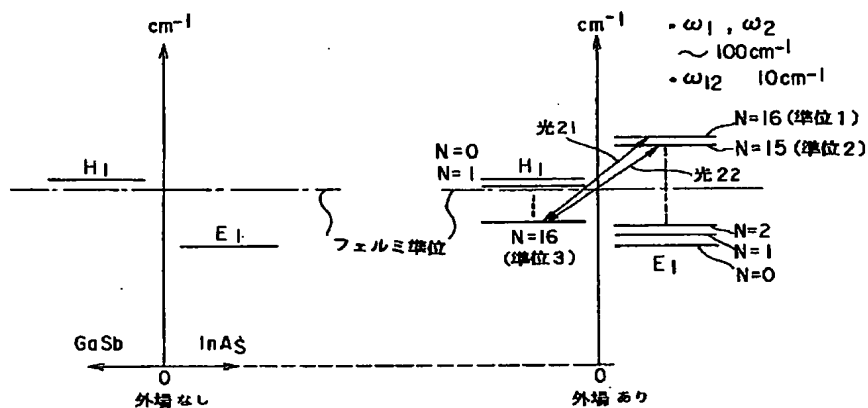
【図41】



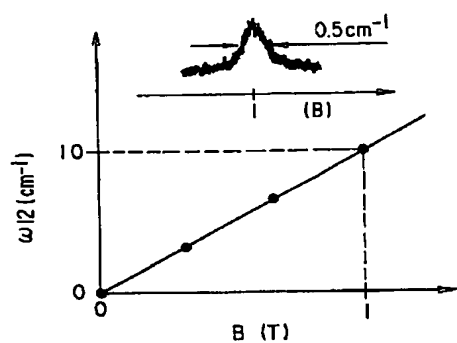
【図42】



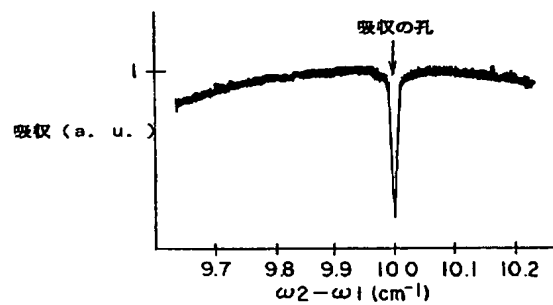
【図 4 3】



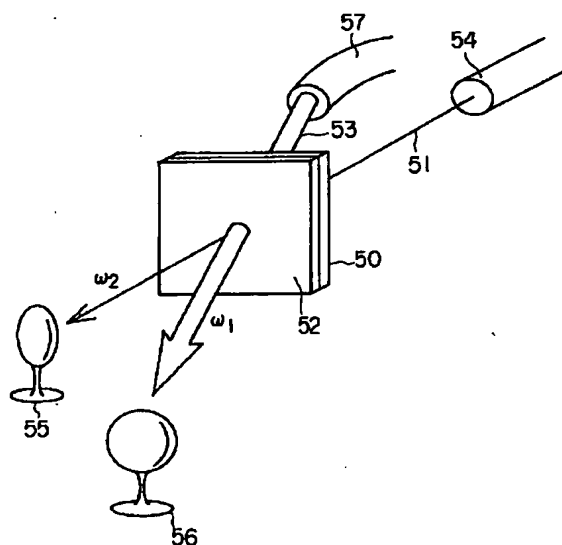
【图 4-4】



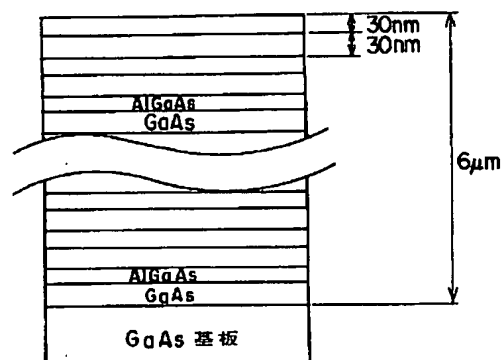
【図 4 5】



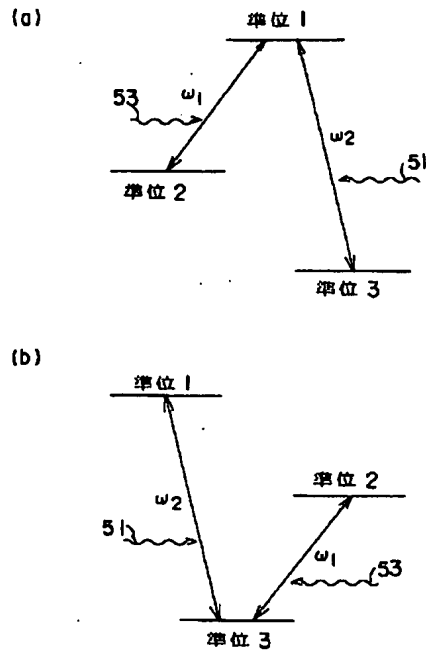
【図 4 6】



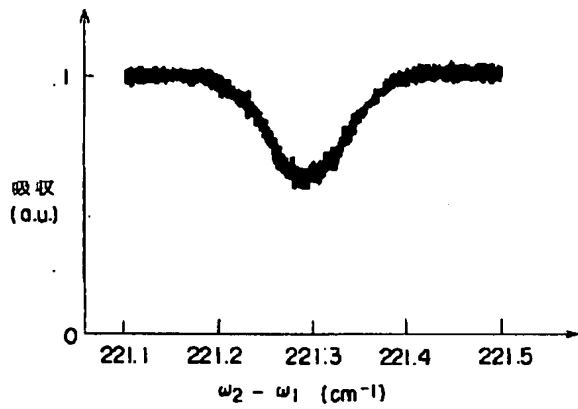
【图 4 8】



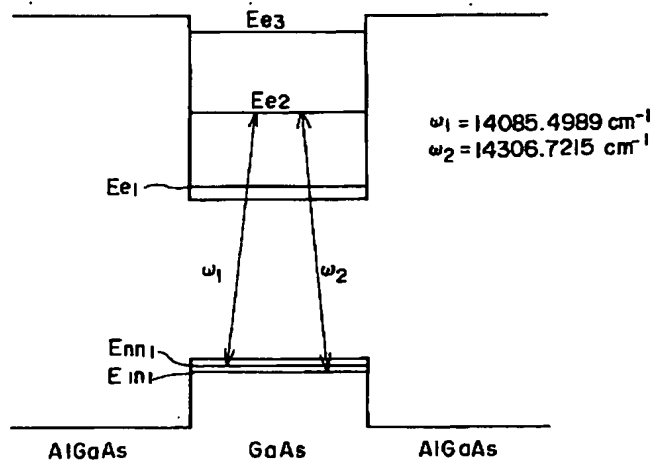
【図 4 7】



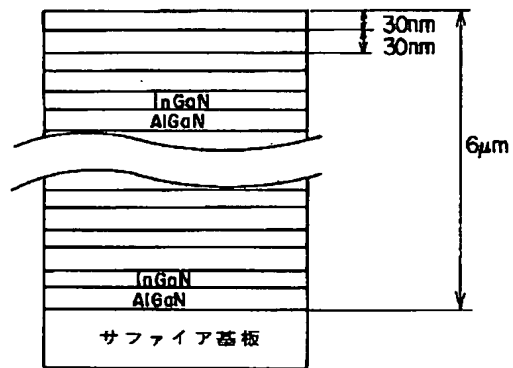
【図 5 0】



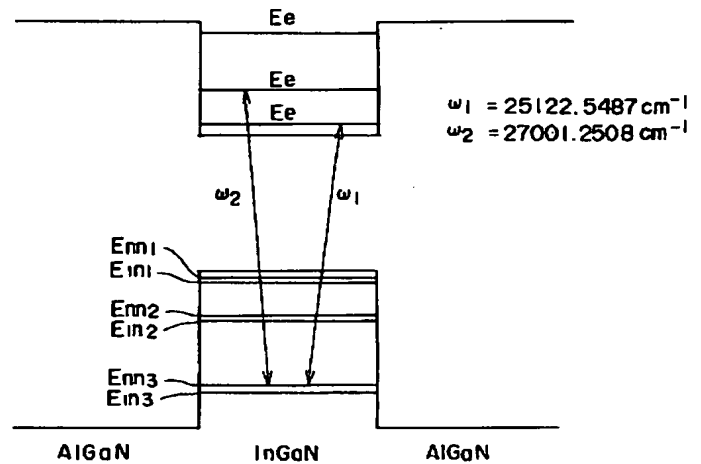
【図 4 9】



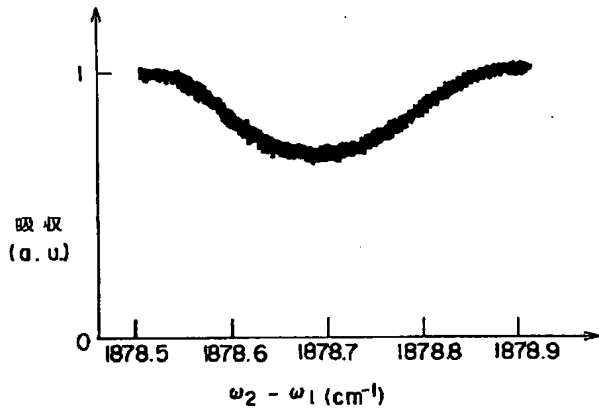
【図 5 1】



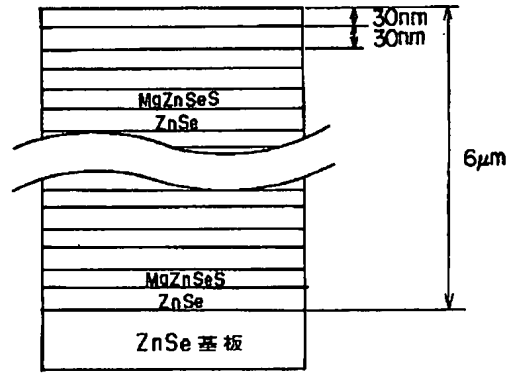
【図 5 2】



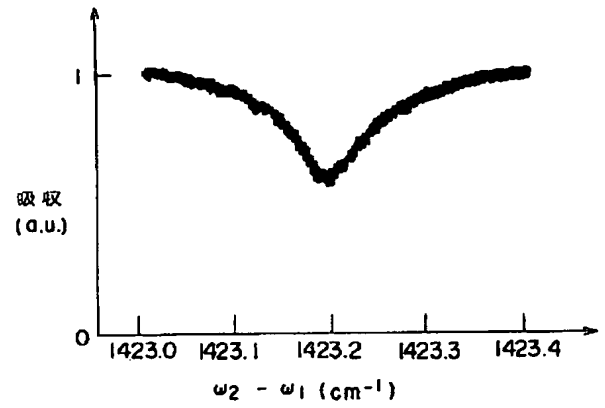
【圖 5 3】



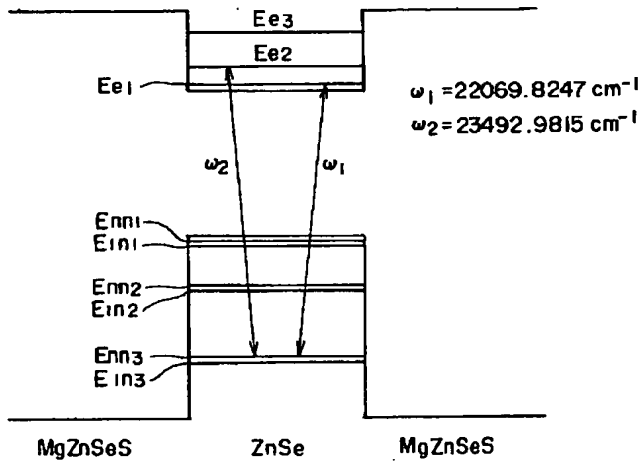
【圖 5 4】



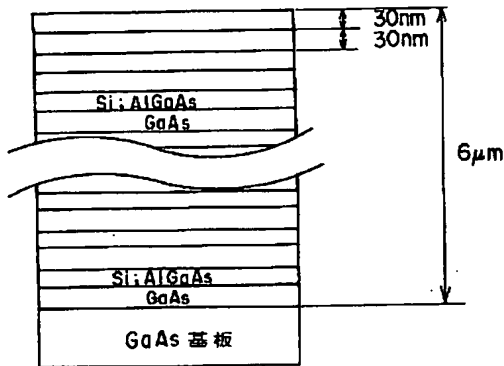
【圖 5 6】



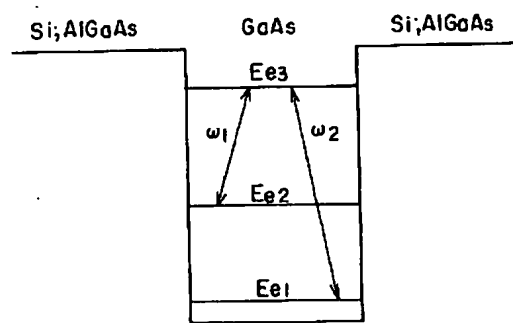
【圖 5 5】



【圖 5 7】



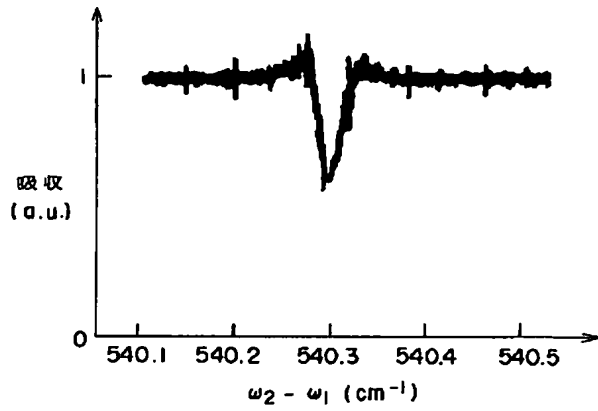
【圖 5 8】



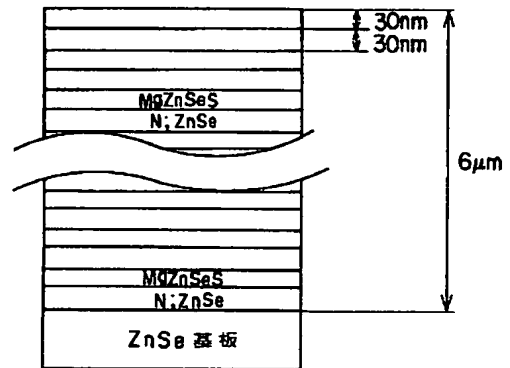
$$\omega_1 = 1024.5583 \text{ cm}^{-1}$$

$$\omega_2 = 1564.9017 \text{ cm}^{-1}$$

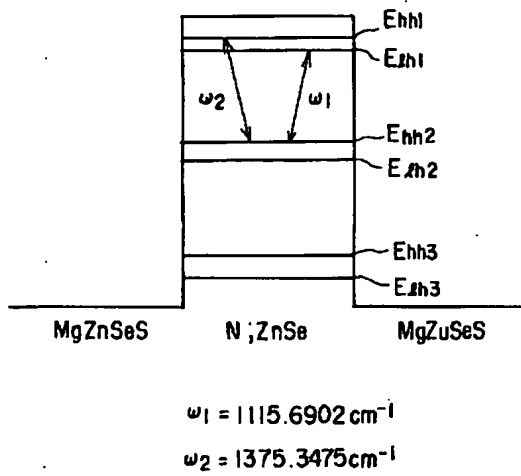
【圖 59】



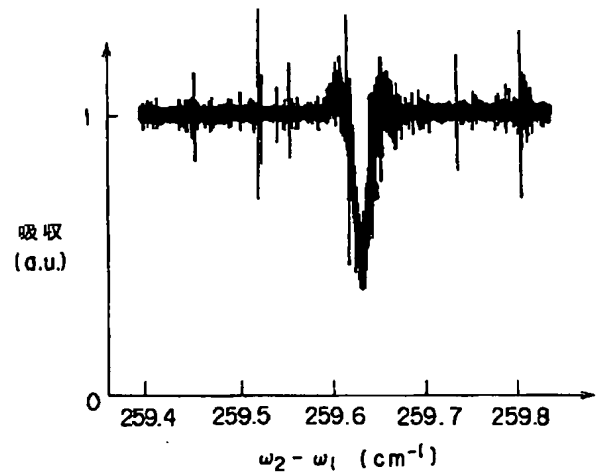
【圖 60】



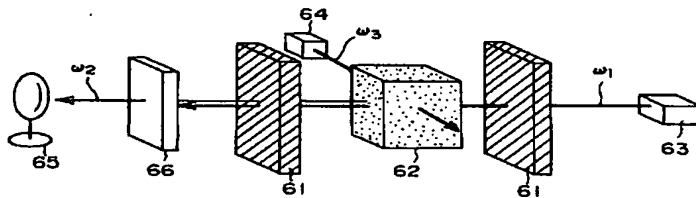
【圖 61】



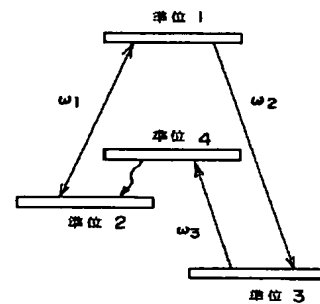
【圖 62】



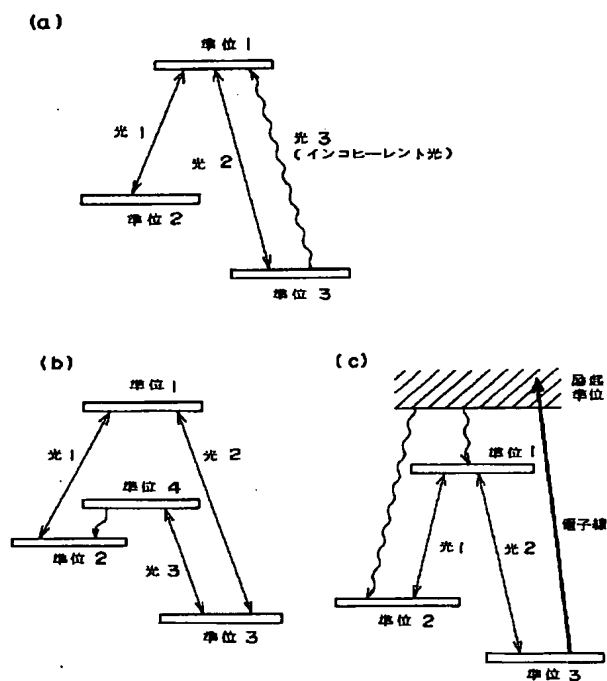
【圖 65】



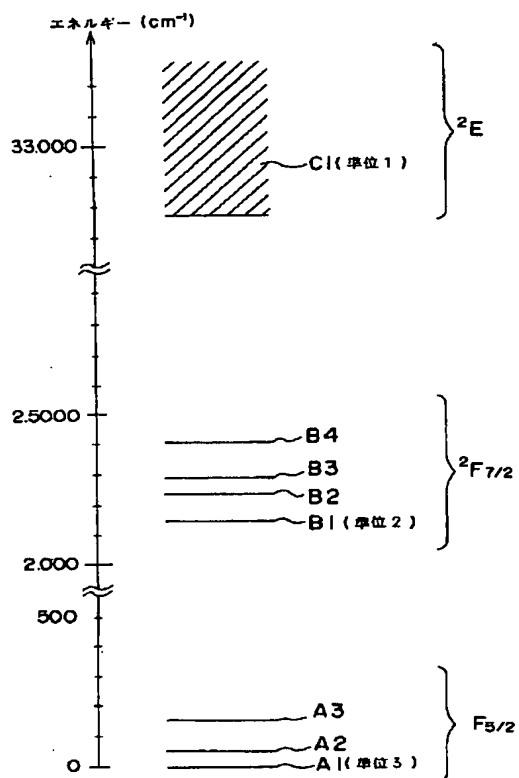
【圖 66】



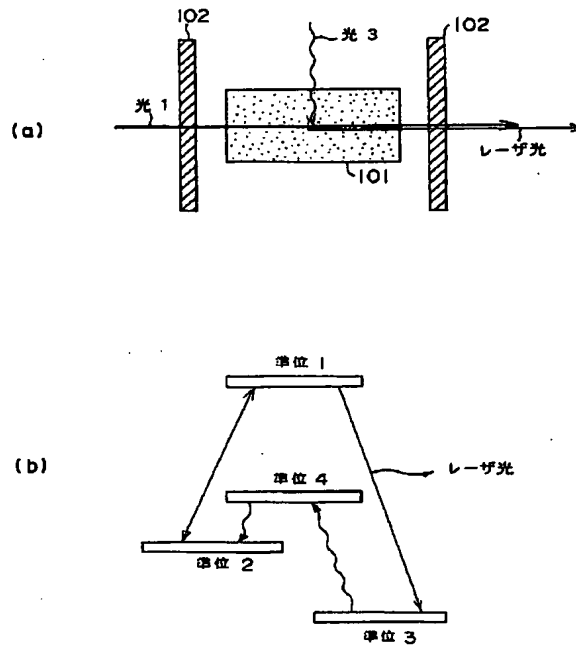
【図63】



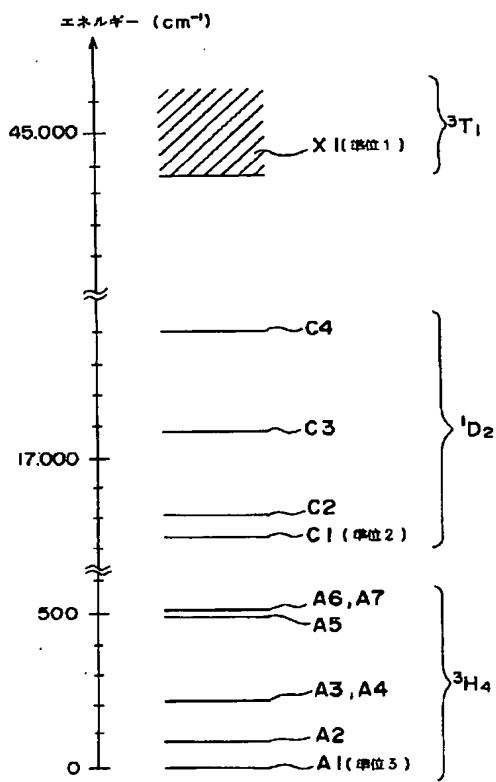
【図67】



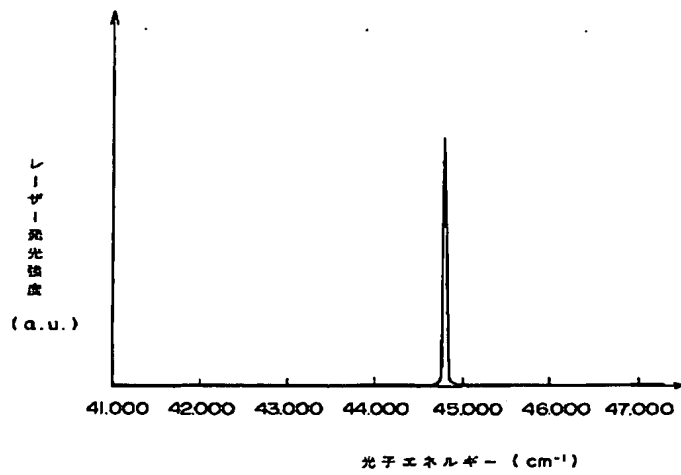
【図64】



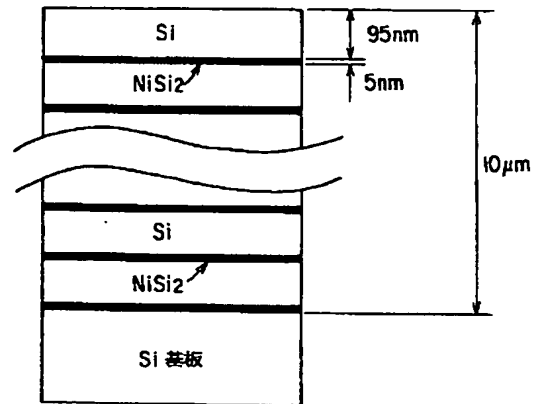
【図68】



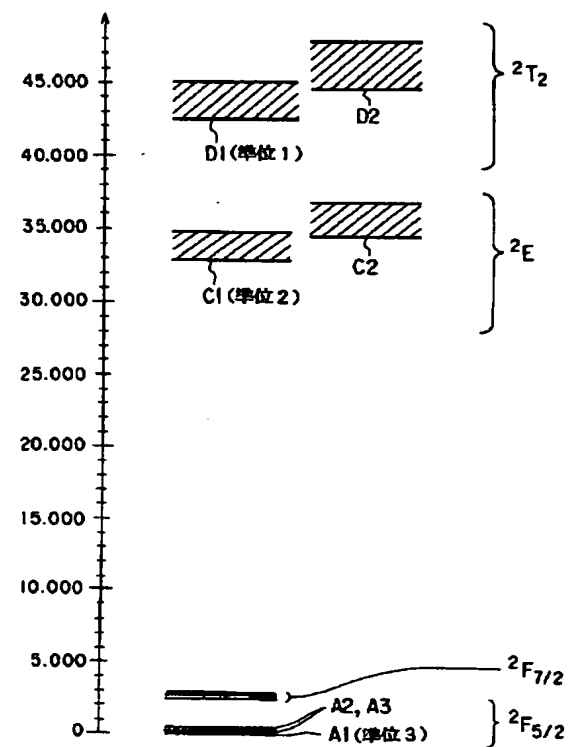
【図 69】



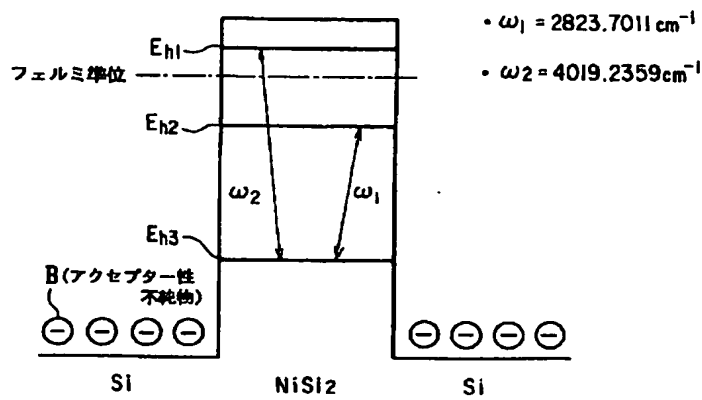
【図 70】



【図 73】

エネルギー (cm⁻¹)

【図 71】



【図 72】

